

ISSN 2658-3518



The 6th International
Conference
Paleolimnology
of Northern Eurasia

LIMNOLOGY & FRESHWATER BIOLOGY



2024, № 4

- > abiotic and biotic water components;
- > ecosystem-level studies;
- > systematics and aquatic ecology;
- > paleolimnology and environmental histories;
- > laboratory experiments and modeling

Introduction to the special issue

Subetto D.A.¹, Rogozin D.Yu.^{2,3}, Fedotov A.P.⁴

¹Herzen State Pedagogical University of Russia, Emb. River Moika 48, Saint-Petersburg, 191186, Russia

²Institute of Biophysics of the Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, Akademgorodok 50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

⁴Limnological Institute SB RAS, 3, Ulan-Batorskaya, Irkutsk, 664033, Russia

Editorial

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

The special issue of the journal “Limnology and Freshwater Biology” presents the materials of the Sixth International Conference “Paleolimnology of Northern Eurasia” and the school of young scientists, which was held in Krasnoyarsk from August 25 to 29, 2024 on the basis of the Siberian Federal University and the Institute of Biophysics of the Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS, which is devoted to a wide range of scientific and methodological issues in the field of paleolimnology and related areas implemented in the vast territory of the Northern part of the Eurasian continent.

The conference is devoted to the problems of reconstruction of the climate, natural conditions, human interaction and the environment of Northern Eurasia in the Pleistocene and Holocene on the basis of complex, interdisciplinary studies of bottom sediments of numerous lakes of various genesis. The conference is aimed at sharing scientific and methodological experience and research results in the field of paleolimnology. Training seminars and lectures for young scientists, postgraduates and students were held. Prospects for further development of paleolimnological research have been identified and plans for joint projects have been developed.

The International Paleolimnological Conference is held regularly every two years alternately in the European and Asian parts of Russia on the basis of universities and research centers of the Russian Academy of Sciences. Previous conferences were held in Petrozavodsk (Institute of Water Problems of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2014), in Yakutsk (Northeastern Federal University named after M. Ammosov, 2016), in Kazan (Kazan (Volga Region) Federal University, 2018), in Irkutsk (Limnological Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020) and in St. Petersburg (Herzen State Pedagogical University of Russia and the Russian Geographical Society).

114 reports were presented at the conference by scientists and specialists from various research institutes and universities of the Russian Federation, as well as from Spain and China. The abstracts published in the special issue are presented by the authors from Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, V.S. Sobolev IGM SB RAS, Lomonosov

Moscow State University, Herzen State Pedagogical University of Russia, Institute of Biophysics of the FSC KSC SB RAS, Kazan (Volga Region) Federal University, M. K. Ammosov NEFU, St. Petersburg State University, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences - St. Petersburg FSC RAS, Siberian Federal University, North-Eastern Integrated Research Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, VNIIOCEANGEOLOGY, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Pacific Institute of Geography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute of the Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Water Problems of the North KarSC RAS, Institute of Geochemistry named after A.P. Vinogradov SB RAS, Perm State Humanitarian and Pedagogical University, Perm State National Research University, Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Geology of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Arctic and Antarctic Research Institute, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Institute of Geology of the Komi Scientific Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Permafrost Institute named after Academician P. I. Melnikova SB RAS, Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the KNC RAS, Institute of Ecology and Evolution named after A. N. Severtsov RAS, Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, TSMC SB RAS, University of Barcelona, Catalonia, University of MSU-PPI in Shenzhen, China, YUU FNC MiG UrB RAS.

The topics of the reports range from narrowly focused on the objects and subjects of research to broad and deep generalizations. Most of the reports are presented by young researchers. The results of interdisciplinary paleolimnological research in recent years demonstrate that this scientific field is actively developing in Russia and abroad, and the scientific paleolimnological community is expanding. Currently, the Paleolimnological Association has been established (<https://paleolim.tilda.ws/main>).

*Corresponding author.

E-mail address: subettoda@herzen.spb.ru (D.A. Subetto)

Received: June 23, 2024; Accepted: July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Вступительное слово

От редактора

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Субетто Д.А.¹, Рогозин Д.Ю.^{2,3}, Федотов А.П.⁴

¹Российский государственный университет им. А. И. Герцена, набережная р. Мойки, 48, 191186, Россия

²Институт биофизики ФИЦ «Красноярский научный центр» СО РАН, Академгородок, 50, стр. 50, Красноярск, 660036, Россия

³Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

⁴Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

Специальный выпуск журнала «Лимнология и пресноводная биология» представляет материалы Шестой международной конференции «Палеолимнология Северной Евразии» и школы молодых ученых, которая состоялась в г. Красноярске с 25 по 29 августа 2024 г. на базе Сибирского федерального университета и Института биофизики ФИЦ «Красноярский научный центр» СО РАН, посвященная широкому кругу научных и методических вопросов в области палеолимнологии и смежных направлений, реализуемых на обширной территории Северной части Евразийского континента.

Конференция посвящена проблемам реконструкции климата, природных обстановок, взаимодействия человека и окружающей среды Северной Евразии в плейстоцене и голоцене на основе комплексных, междисциплинарных исследований донных отложений многочисленных озер различного генезиса. Конференция направлена на обмен научно-методическим опытом и результатами исследований в области палеолимнологии. Проведены обучающие семинары и лекции для молодых ученых, аспирантов и студентов. Определены перспективы дальнейшего развития палеолимнологических исследований и разработаны планы совместных проектов.

Международная палеолимнологическая конференция проводится регулярно один раз в два года поочередно в европейской и азиатской частях России на базе университетов и научных центров Российской академии наук. Предыдущие конференции были проведены в г. Петрозаводске (Институт водных проблем Карельского научного центра РАН, 2014 г.), в г. Якутске (Северо-восточный федеральный университет им. М. Аммосова, 2016 г.), в г. Казани (Казанский (Волжский) федеральный университет, 2018 г.), в г. Иркутске (Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, 2020 г.) и в г. Санкт-Петербурге (Российский государственный университет им. А. И. Герцена и Штаб-квартира Русского географического общества).

На конференции представлено 114 докладов учеными и специалистами из различных научно-исследовательских институтов и университетов Российской Федерации, а также из Испании и Китая.

Тезисы, опубликованные в специальном выпуске, представлены авторами из Института географии РАН, ИГМ им. В.С. Соболева СО РАН, МГУ имени М. В. Ломоносова, РГПУ им. А. И. Герцена, Института биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Казанского (Волжского) федерального университета, СВФУ им. М. К. Аммосова, СПбГУ, Института озераведения РАН - СПб ФИЦ РАН, Сибирского федерального университета, Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института ДВО РАН, ВНИИОкеангеологии, Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Тихоокеанского института географии ДВО РАН, Геологического института ФИЦ КНЦ РАН, Института водных проблем Севера КарНЦ РАН, Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета, Пермского государственного национального исследовательского университета, Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Института геологии Карельского научного центра РАН, Арктического и антарктического научно-исследовательского института, Института археологии и этнографии СО РАН, Института геологии Коми научного центра УРО РАН, Института мерзлотоведения им. академика П. И. Мельникова СО РАН, Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Института экологии растений и животных УрО РАН, ТюмНЦ СО РАН, Университета Барселона, Каталония, Университета МГУ-ППИ в Шэньчжэне, Китай, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

Тематика докладов варьирует от узконаправленных по объектам и предметам исследования до широких и глубоких обобщений. Больше часть докладов представлены молодыми исследователями. Результаты междисциплинарных палеолимнологических исследований последних лет демонстрирует, что это научное направление активно развивается в России и за рубежом, происходит расширение научного палеолимнологического сообщества. В настоящее время создана палеолимнологическая ассоциация (<https://paleolim.tilda.ws/main>).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: subettoda@herzen.spb.ru (Д.А. Субетто)

Поступила: 23 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Correlation of the Taipalovskii Bay coastal formations with Holocene Lake Ladoga water-level fluctuations



Aksenov A.O.^{1,2,3*}, Bolshiyarov D.Yu.¹, Pravkin S.A.¹, Lebedev G.B.¹

¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Beringa str., 38, Saint-Petersburg, 199397, Russia

² St Petersburg University, Universitetskaya emb., 7/9, Saint-Petersburg, 199034, Russia

³ A.P. Karpinsky Russian Geological Institute, Srednii Av., 74, Saint-Petersburg, 199106, Russia

ABSTRACT. The study presents preliminary results of investigating the coastal morphosystem of the Taipalovskii Bay in Lake Ladoga, aimed at reconstructing water-level fluctuations. The comprehensive research conducted includes: geomorphological profiling, peat coring, OSL dating of shoreline deposits, radiocarbon dating of peat deposits, and diatom analysis of dated samples. It has been established that the accumulative shore of the bay was formed throughout the Holocene due to multiple transgressive-regressive cycles. It is suggested that the large beach bar, previously believed to have formed during the Ladoga transgression, already existed in the mid-Holocene. The maximum level of the transgression itself is estimated to be around 14-15 meters in height.

Keywords: Lake Ladoga, the Holocene, water-level fluctuations, coastal geomorphology, OSL-dating, radiocarbon dating

For citation: Aksenov A.O., Bolshiyarov D.Yu., Pravkin S.A., Lebedev G.B. Correlation of the Taipalovskii Bay coastal formations with Holocene Lake Ladoga water-level fluctuations // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 223-228. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-223

1. Introduction

The shore of the Taipalovskii Bay (south of the Burnaya River) represents an accumulative coastal morphosystem, consisting of sandy terraces complicated by parallel ridges along the shoreline, an extensive large barrier ridge (up to 5 meters high), and peat bogs formed in the place of a paleolagoon. This area was first described in a seminal work by J. Ailio, dedicated to the study of the Lake Ladoga shoreline (1915). The Finnish researcher, based on his own field observations, concluded that the barrier ridge formed during the Ladoga transgression, and its formation led to the separation of Lake Sukhodolskoye from the Ladoga water area. This study presents materials that allow for a more precise history of the development of this region.

2. Materials and methods

For this study, geomorphological profiling was conducted using a GEOBOX No. 8-23 optical leveling instrument. The leveling data were tied to a triangulation point of the state geodetic network, allowing for the determination of elevation marks in the Baltic

height system. To correlate the observed paleo-shorelines, samples of coastal deposits were taken at several sites for OSL dating. The dating was carried out at the OSL laboratory of the Karpinsky Institute. Additionally, fieldwork included peat bog drilling using a Russian peat borer. The peat deposit samples were dated using the radiocarbon method at the Laboratory of Geomorphological and Paleogeographical Research of Polar Regions and the World Ocean at the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University. Furthermore, a diatom analysis of the collected samples was performed by Z.V. Pushina, a specialist from the FSBI "VNIIOkeangeologia".

3. Results

In Figure 1, a geomorphological profile of the coastline with the obtained datings is presented. The age of the deposits at the base of the beach ridge, located at an elevation of 11.5 meters, is 2900 ± 200 years BP (RGI-1174). A sample taken from the barrier ridge yielded a dating of 5000 ± 400 years BP (RGI-1173). According to the leveling data, the bar has a relative height of 4.4 meters, with its base located at 17

*Corresponding author.

E-mail address: aksenov2801@gmail.com (A.O. Aksenov)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.





Fig. 1. Geomorphological profile of the Taipalovskii Bay shore. 1 – sand-gravel-pebble deposits; 2 – sands; 3 – peat; 4 – sampling points; 5 – water level on the day of leveling survey; 6 – OSL age; 7 – radiocarbon age, calibrated age is given in parentheses.

meters and its crest at 21.4 meters. Behind the ridge, an undulating surface is observed, with elevations ranging from 15 to 16 meters. On this surface, at the distal base of the ridge, the OSL age of the deposits is 8100 ± 800 years BP. Further from the ridge, a peat bog is observed, with the peat thickness increasing towards the shore. At the site RP-3267, the peat thickness was found to be 1.1 meters. The radiocarbon age of the peat base here is 4660 ± 100 14C years BP (5360 ± 150 cal years BP). In boreholes drilled at the abrasion scarp, the core thickness was 3.5 meters. The elevation of the borehole mouths is 16.5 meters. The lithology of the cores is shown in Figure 2.

4. Discussion and conclusion

The research results provide some preliminary conclusions about the dynamics of Lake Ladoga's water level in this area. Firstly, there is no evidence of water level rise above 14-15 meters during the Ladoga transgression (the maximum stage of which occurred 3100-2800 14C years BP (Saarnisto, 2012)). The nearest datings, obtained within a close age range (2500-2600 years BP), pertain to layers of gyttja and silts at elevations of 14.5 and 13.5 meters respectively, as well as to the deposits of the barrier ridge at 11.5 meters. This is corroborated by studies of sediment sections from the valleys of the Burnaia, Viun, and Fedorovka rivers, where Ladoga transgression deposits are recorded below 15 meters (Verzilin et al., 2001). This casts doubt on the accuracy of Y. Ailio's conclusions regarding the formation of the Taipalovskii Bay barrier ridge during the Ladoga transgression. The age of the ridge deposits, determined to be 5000 ± 400 years BP, is quite close to the end of the Littorina transgression in the Baltic Sea. Lacustrine deposits from this period were also previ-

ously uncovered in the Viun River valley (Znamenskaya and Ananova, 1967). Thus, two transgressive stages corresponding to the Ladoga and Littorina transgressions are established. The oldest sediments identified in this study are found in the 14-15 m terrace deposits and the base of the peat bog cores. These datings are assumed to correspond to the end of another early Holocene transgressive phase.

Therefore, the data suggest the presence of three Holocene transgressive-regressive cycles in this area. These results differ significantly from the information on the structure of Holocene deposits in Southern Ladoga area, where they are most often represented only by mid-Holocene peats or buried soils overlain by Ladoga transgression sediments (Markov, 1949). The authors hope that further research will determine the cause of these differences.

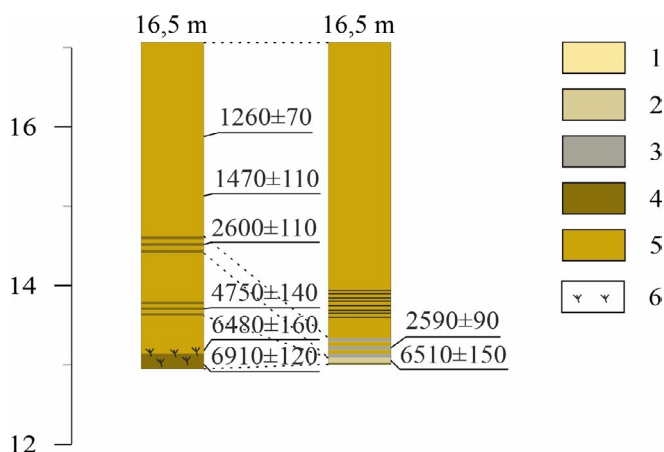


Fig. 2. Lithology of the peat cores and radiocarbon datings. 1 – sands; 2 – sandy silts; 3 – silts; 4 – gyttja; 5 – peat; 6 – plant macrofossils.

Acknowledgments

The study was conducted with the support of a grant from the Russian Science Foundation № 23-27-00273 “An assessment of Lake Ladoga level decrease rate during the last 3000 years obtained from results of coastal landforms absolute dating”, <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Ailio J. 1915. Die geographische Entwicklung des Ladogasees in postglazialer Zeit und ihre Beziehung zur

steinzeitlichen Besiedelung. Bulletin de la commission Geologique de Finlande 45: 1-186. (in German)

Markov K.K. 1949. Postglacial History of the Southeastern Shore of Lake Ladoga. Voprosy geografii [Geography questions] 12: 213-220. (in Russian)

Znamenskaya O.M., Ananova E.N. 1967. New Data on the History of the Western Shore of Lake Ladoga. In: Istoriya ozer severo-zapada. Leningrad, pp. 132-140. (in Russian)

Verzilin N.N., Kleimenova G.I., Sevastianov D.V. 2001. On the History of Landscape and Hydrographic Network Development in the Karelian Isthmus. Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Geographical Society] 133(3): 58-69. (in Russian)

Saarnisto M. 2012. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. Quaternary International 260: 143–152. DOI: [10.1016/j.quaint.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005)

Корреляция береговых образований Тайпаловского залива с изменениями уровня Ладожского озера в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYАксенов А.О.^{1,2,3*}, Большианов Д.Ю.¹, Правкин С.А.¹, Лебедев Г.Б.¹¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397, Россия² Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия³ Всероссийский научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены предварительные результаты изучения береговой морфосистемы Тайпаловского залива Ладожского озера с целью реконструкции колебания уровня воды. В комплекс проведенных исследований входят: геоморфологическое профилирование, бурение торфяников, датирование отложений береговых форм рельефа ОСЛ-методом и болотных отложений радиоуглеродным методом, диатомовый анализ датируемых образцов. Установлено, что аккумулятивный берег залива формировался на протяжении всего голоцена за счет неоднократных трансгрессивно-регрессивных циклов. Предполагается, что крупный береговой бар, который, как полагали ранее, сформировался во время Ладожской трансгрессии, уже существовал в среднем голоцене. А уровень максимума самой трансгрессии оценивается на высоте около 14-15 м.

Ключевые слова: Ладожское озеро, голоцен, колебания уровня воды, береговая геоморфология, ОСЛ-датирование, радиоуглеродное датирование

Для цитирования: Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б. Корреляция береговых образований Тайпаловского залива с изменениями уровня Ладожского озера в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 223-228. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-223](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-223)

1. Введение

Побережье Тайпаловского залива (к югу от реки Бурной) представляет собой аккумулятивную береговую морфосистему, состоящую из песчаных террас, осложненных параллельными береговой линии валами, протяженного, крупного (до 5 м высотой) берегового бара, а также торфяников, сформированных на месте палеолагуны. Впервые этот участок был описан в фундаментальной работе Ю. Айлио, посвященной исследованию побережья Ладожского озера (1915). Финский исследователь, на основе собственных полевых наблюдений, пришел к выводу о том, что береговой бар возник во время Ладожской трансгрессии, и собственно его образование привело к отчленению озера Суходольского от ладожской акватории. В данной работе представлены материалы, позволяющие уточнить историю развития этого района.

2. Методы работ

Для выполнения текущего исследования было выполнено геоморфологическое профилирование при помощи оптического нивелира ГЕОВОХ №8-23. Данные нивелирования были привязаны к триангуляционному пункту государственной геодезической сети, что позволяет определить высотные отметки в Балтийской системе высот. Для привязки наблюдаемых древних береговых линий на нескольких точках были отобраны образцы отложений береговых форм рельефа для ОСЛ-датирования. Датирование выполнялось в ОСЛ-лаборатории Института Карпинского. Кроме того, полевые работы включают в себя бурение торфяников при помощи русского торфяного бура. Образцы отложений торфяников датированы радиоуглеродным методом в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: aksenov2801@gmail.com (А.О. Аксенов)

Поступила: 10 июня 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.





Рис.1. Геоморфологический профиль побережья Тайпаловского залива. 1 – печано-гравийно-галечные отложения; 2 – пески; 3 – торфа; 4 – точки пробоотбора; 5 – уровень воды в день нивелирной съемки; 6 – ОСЛ-возраст; 7 – радиоуглеродный возраст, в скобках указан калиброванный.

Мирового Океана Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета. Также специалистом ФГБУ «ВНИИОкеангеология» Пушиной З.В. был выполнен диатомовый анализ отобранных образцов.

3. Результаты

На рис. 1 представлен геоморфологический профиль побережья с полученными датировками. Возраст отложений вала, подножие которого расположено на высоте 11,5 м составил 2900 ± 200 л.н. (RGI-1174). По образцу, отобранному из бара, получена датировка 5000 ± 400 л.н. (RGI-1173). Сам бар, по данным нивелирования, имеет относительную высоту 4,4 м, его подножие находится на высоте 17 м, а гребень – на 21,4 м. За баром наблюдается волнистая поверхность, высоты которой варьируются в пределах 15-16 м. На ее поверхности, у дистального подножия бара, ОСЛ-возраст отложений составил 8100 ± 800 л.н. Дальше от бара наблюдается торфяник. Мощность торфа увеличивается по направлению от берега. В шурфе (ТН-3267) его мощность оказалась равна 1,1 м. По основанию торфа здесь получен радиоуглеродный возраст 4660 ± 100 ^{14}C л.н. (5360 ± 150 кал. л.н.). В скважинах, выполненных у абразионного уступа, мощность керна составила 3,5 м. Высота устья скважин равна 16,5 м. Литология кернов показана на рис. 2.

4. Обсуждение результатов

Результаты исследований позволяют получить некоторые предварительные выводы о динамике уровня Ладожского озера в этом районе.

Во-первых, признаков повышения уровня воды выше 14-15 м во время Ладожской трансгрессии (максимальная стадия которой произошла 3100-2800 ^{14}C л.н. (Saarnisto, 2012)) не наблюдается. Ближайшие датировки, полученные в близком возрастном промежутке (2500-2600 л.н.) относятся к прослоям гиттии и алевритов на высотах 14,5 и 13,5 м соответственно, а также к отложениям берегового вала на высоте 11,5 м. Это подтверждают и исследования разрезов отложений долин рек Бурной, Вьюна и Федоровки, где отложения Ладожской трансгрессии фиксируются ниже 15 м (Верзилин и др., 2001). Это позволяет подвергнуть сомнению правильность выводов Ю. Айлио о формировании берегового бара Тайпаловского залива во время Ладожской трансгрессии. Возраст, полученный по отложениям бара, составил 5000 ± 400 л.н., что довольно

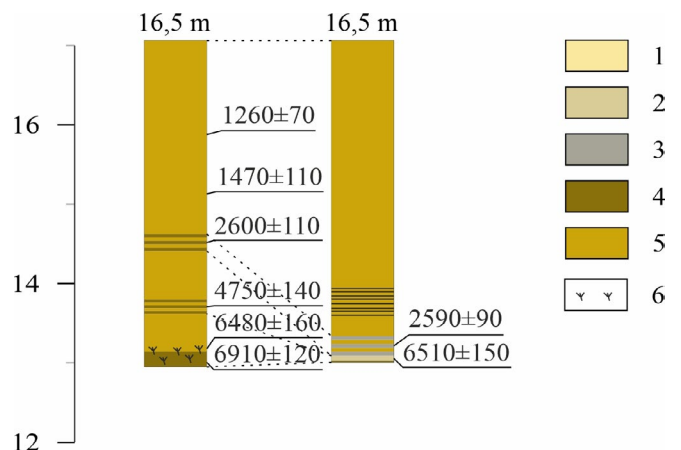


Рис.2. Литологическое строение кернов торфяника и радиоуглеродные датировки. 1 – пески; 2 – песчанистые алевриты; 3 – алевриты; 4 – гиттии; 5 – торфа; 6 – растительные макроостатки.

близко к завершению Литориновой трансгрессии на Балтийском море. Озерные отложения этого времени также были вскрыты ранее в долине реки Вьюн (Знаменская и Ананова, 1967). Таким образом, устанавливается два трансгрессивных этапа, соответствующих Ладожской и Литориновой трансгрессиям. Наиболее древние осадки, определенные в данном исследовании, обнаружены в отложениях 14-15-метровой террасы, а также в основании кернов болота. Предполагается, что эти датировки относятся к завершению еще одной, раннеголоценовой трансгрессивной фазы.

Таким образом, полученные данные позволяют предполагать наличие трех голоценовых трансгрессивно-регрессивных циклов в этом районе. Эти результаты значительно отличаются от сведений о строении голоценовых отложений Южного Приладожья, где они чаще всего представлены только среднеголоценовыми торфами или погребенными почвами, перекрытыми осадками Ладожской трансгрессии (Марков, 1949). Авторы надеются, что дальнейшие исследования позволят определить причину этих различий.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00273 “Оценка темпов снижения уровня Ладожского озера

за последние 3000 лет по результатам абсолютного датирования береговых форм рельефа”, <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Верзилин Н.Н., Клейменова Г.И., Севастьянов Д.В. 2001. К истории развития ландшафтов и гидрографической сети на Карельском перешейке. Известия Русского географического общества 133(3): 58–69.

Знаменская О.М., Ананова Е.Н. 1967. Новые данные по истории западного побережья Ладожского озера. В: История озер северо-запада. Ленинград, с. 132–140.

Марков К.К. 1949. Послеледниковая история юго-восточного побережья Ладожского озера. Вопросы географии (12): 213–220.

Ailio J. 1915. Die geographische Entwicklung des Ladogasees in postglazialer Zeit und ihre Beziehung zur steinzeitlichen Besiedelung. Bulletin de la commission Geologique de Finlande 45: 1-186. (in German)

Saarnisto M. 2012. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. Quaternary International 260: 143–152. DOI: [10.1016/j.quaint.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005)

Hyperspectral imaging of sediment cores - a case study of Lake Khorlaket (Western Caucasus)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Alexandrin M.Y.*, Molenkamp N.B.

Institute of Geography RAS, 29 building 4 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The study focuses on the hyperspectral imaging of sediment cores – a novel analytical method providing high-resolution biogenic markers – with sediment core of Lake Khorlaket (Western Caucasus) as a case study.

Keywords: hyperspectral imaging, lake sediments, high-resolution analyses, biogenic markers, Caucasus

For citation: Alexandrin M.Y., Molenkamp N.B. Hyperspectral imaging of sediment cores - a case study of Lake Khorlaket (Western Caucasus) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 229-233. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-229

1. Introduction

During the last decades high-resolution methods of sedimentary analyses have provided a huge leap in understanding natural processes and allowed state-of-the-art paleoclimatic reconstructions. Hyperspectral imaging is a novel method for the analysis of sediment cores with a number of crucial advantages – it offers high-resolution data; it is non-destructive while being time and cost-efficient. Here we present our first experience of hyperspectral imaging of a sediment core of Lake Khorlaket located in the Western Caucasus and uncover the method's potential for paleoreconstructions.

2. Materials and methods

Within the facilities of the Laboratory of environmental paleoarchives of the Institute of Geography RAS a dedicated setup for hyperspectral imaging of sediment cores was recently built. It is comprised of a hyperspectral camera, a compatible Specim LabScanner with halogen lamp lighting and custom-made dollies for scanning long sediment cores. The camera Specim FX10 works in a line-scan mode in the visible and near-infrared (VNIR) area (400-1000 nm region) with 448 spectral bands. The spatial resolution of the acquired images is 229 µm with a mean spectral resolution of 5.5 nm. The core was scanned in 8 sections of approximately 40cm, resulting in an overlap of approximately 10cm per section.

A specialized software package was developed for processing, calibration, stitching and analysis of the

hyperspectral data. The scans were corrected for dark counts (closed shutter), white reference (Teflon calibration sample), keystone and smile effects. Regions of interest were selected from the center of each sediment section and were subsequently stitched by minimizing the SSE (sum of square error) of the overlap between sections. Cracks in the core, due to the drying process were identified in the image and subsequently ignored during calculations. The resultant preprocessed data is a hyperspectral data cube with first two dimensions corresponding to the length and width of an image in pixels and a third spectral dimension.

Lake Khorlaket (43°29'36"N; 42°13'05"E, 2063 m a.s.l.) is situated 20 km west-north-west of the Elbrus Massif and approx. 60 km north of the Main Caucasus Ridge. The mean depth is 3.8 m with a maximum depth of 8 m in the central part of the lake. The sediment core HOR1 of Lake Khorlaket (Western Caucasus) was used as a pilot object for our hyperspectral imaging project due to its contrasting sedimentary facies with alternating thin-layered clayey sections and gyttja sections.

The core has been subject to a number of sedimentary analyses including conventional laboratory analyses carried out within the facilities of the IG RAS as well as high-resolution micro-XRF analysis with the use of GEOTEK MSCL-XYZ Workstation at the Institute of Oceanology RAS. The age-depth model for the core HOR1 is robust – it is based on 11 AMS 14C dates and spans ca. 6700-1500 cal BP. The lake's catchment area and abrupt sedimentation changes have been subject to detailed geomorphic study (Shvarev et al., 2023).

*Corresponding author.

E-mail address: alexandrin@igras.ru (M.Y. Alexandrin)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and discussion

Within the VNIR area a number of spectral indicators reflecting certain variability of sedimentary properties were reported. Here we focus on the most used and credible of them – an absorption feature around 670 nm. Chlorophyll *a* and its degradation products are known to absorb in similar regions of the electromagnetic spectrum between 650-700 nm. A spectral fingerprint of chlorophyll *a* and its derivatives can thus be estimated by means of calculating the depth of an absorption feature around 670 nm – Relative absorption band depth – RABD670 or, alternatively, as an area of an absorption feature or RABA670 (Rein and Sirocko, 2002). A number of studies report extremely high correlations between those parameters and chlorophyll *a* concentrations directly measured with high-performance liquid chromatography (HPLC) (Wolfe et al., 2006). The general approach is that organic-rich sediments will have higher values of these parameters as opposed to those primarily affected by terrigenous mineroclastics.

In this study, we investigate the potential of the chlorophyll *a* related spectral indices of the sediment core of Lake Khorlaket to reflect the downcore variations of organic content and productivity. In order to trace that, we have performed a correlation and multivariate analysis of the dataset consisting of RABD670 and RABA670 values, micro-XRF-derived elemental concentrations, results of laboratory analyses (LOI550, magnetic susceptibility, grain size).

The results indicate a consistent relation between our spectral indices and the other known biogenic proxies. Specifically, we have established that RABD670 or RABA670 are correlated with the content of bromine that we previously used a high-resolution marker for heat availability in the Caucasus (Alexandrin et al., 2023) as well as with XRF incoherent/coherent scattering ratio and loss-on-ignition (Spearman's correlation coefficients in the 0.48-0.77 range). High negative correlation coefficients (Spearman's -0.62-0.86) are registered for RABD670 or RABA670 and the concentrations of lithogenic elements and magnetic susceptibility.

4. Conclusions

We argue that RABD670 or RABA670 parameter can be used as a high-resolution proxy for autochthonous productivity. In the case of Lake Khorlaket, the

temporal resolution of our spectral chronology is less than 1 year. Such a high temporal resolution allows for detailed reconstructions of certain short-term climatic events, uncovering internal periodicity, along with general reconstructions of long-term variability.

5. Acknowledgments

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

We thank Dmitry Borisov (Institute of Oceanology RAS) for assistance with micro-XRF analysis

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. 2023. Variations of heat availability in the Western Caucasus in the past 1500 years inferred from a high-resolution record of bromine in the sediment of Lake Karakel. *Quaternary International* 664: 20-32.
- Rein B., Sirocko F. 2002. In-situ reflectance spectroscopy-analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. *International Journal of Earth Sciences* 91: 950-954.
- Shvarev S.V., Alexandrin M.Y., Ivanov M.M. et al. 2023. The Interaction of Climatic and Tectonic Factors in the Formation of Sediment Runoff in the Holocene in the Khorlaket Lake Catchment (North Caucasus). In *Doklady Earth Sciences* 513 (1): S75-S96. DOI: [10.1134/S1028334X23602390](https://doi.org/10.1134/S1028334X23602390)
- Wolfe A.P., Vinebrooke R.D., Michelutti N. et al. 2006. Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll *a* concentrations: methodology and paleolimnological validation. *Journal of Paleolimnology* 36: 91-100. DOI: [10.1007/s10933-006-0006-6](https://doi.org/10.1007/s10933-006-0006-6)

Гиперспектральное сканирование кернов донных осадков - на примера озера Хорлакель (Западный Кавказ)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Александрин М.Ю.*, Моленкамп Н.Б.

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.

АННОТАЦИЯ. В работе рассматривается гиперспектральное сканирование кернов донных осадков – новый метод анализа, обеспечивающий получение биогенных маркеров с высоким разрешением. В качестве примера используется керн донных осадков озера Хорлакель (Западный Кавказ).

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, озерные осадки, анализы высокого разрешения, биогенные маркеры, Кавказ

Для цитирования: Александрин М.Ю., Моленкамп Н.Б. Гиперспектральное сканирование кернов донных осадков - на примера озера Хорлакель (Западный Кавказ) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 229-233. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-229

1. Введение

Благодаря высокоразрешающим анализам кернов донных осадков за последнее время достигнут значительный прогресс в понимании природных процессов. На их основе было создано множество детальных палеорекопструкций. Гиперспектральная съемка – метод анализа кернов донных осадков, который стал применяться относительно недавно. Метод имеет ряд принципиальных преимуществ – он обеспечивает данные высокого разрешения, является неdestructивным, не требует значительных вложений времени и средств. Настоящая работа рассматривает первый опыт гиперспектрального сканирования керна донных осадков озера Хорлакель (Западный Кавказ) в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН и раскрывает возможности метода для создания на его основе детальных палеорекопструкций.

2. Материалы и методы

В Лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН была создана установка для гиперспектральной съемки озерных кернов. Она состоит из гиперспектральной камеры, совместимого с ней сканера Specim LabScanner с галогеновым освещением и оборудования для прокатки длинных кернов. Используемая камера Specim FX10 работает в режиме линейного сканирования в видимой и ближней инфракрасной (VNIR) частях электро-

магнитного спектра (диапазон 400-1000 нм) с 448 спектральными каналами. Пространственное разрешение полученных данных составляет 229 мкм, среднее спектральное разрешение – 5,5 нм. Керн сканировался в виде восьми участков по 40 см с перекрытием около 10 см.

Для обработки, калибровки, сшивания и анализа гиперспектральных данных специалистами ИГ РАН был разработан специализированный программный продукт. Изображения корректировались по черному (закрытый объектив) и белому (калибровочный образец от производителя) стандартам. Из керна выбирались центральные участки, которые далее сшивались с помощью метода наименьших квадратов для значений отражательной способности на перекрывающихся участках. Трещины, возникшие в результате усыхания керна, удались и не использовались в дальнейшем анализе. Итоговые данные представляют собой гиперкуб – трехмерный массив данных с двумя измерениями в виде длины и ширины изображения в пикселях и третьим спектральным измерением (максимальное число каналов – 448).

Озеро Хорлакель (43°29'36»N; 42°13'05»E, 2063 м н.у.м) расположено в 20 км к запад-северо-западу от массива Эльбруса и примерно в 60 км от Главного Кавказского хребта. Средняя глубина озера 3,8 м, максимальная – 8 в центральной части. Керн HOR1 использован нами в качестве пилотного объекта для гиперспектрального сканирования благодаря своему литостратиграфическому разно-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: alexandrin@igras.ru (М.Ю. Александрин)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



образию – керн сложен чередующимися участками тонкослоистых глин и сапропеля с различными спектральными свойствами. Кроме того, для керна HOR1 был сделан ряд лабораторных анализов – как на дискретных образцах (ИГ РАН), так и высокоразрешающий сканирующий микро-РФА анализ с помощью рабочей станции GEOTEK MSCL-XYZ (Институт океанологии РАН). Возрастная модель керна HOR1 надежно закреплена с помощью одиннадцати радиоуглеродных (AMS) датировок и охватывает период 6700-1500 календарных лет назад. Особенности стока наносов на водосборе озера Хорлакель были также детально изучены (Шварев и др., 2023).

3. Результаты и обсуждение

В ходе предыдущих исследований в пределах видимой – ближней ИК частей спектра был обнаружен ряд спектральных индексов, косвенно отражающих вариации тех или иных свойств в осадке и, соответственно, условий и процессов осадконакопления. В настоящей работе рассматривается самый достоверный из них – увеличенное поглощение (или понижение значения отражательной способности) в части электромагнитного спектра, соответствующей длине волн в районе 670 нм. Известно, что хлорофилл *a*, необходимый большинству фотосинтезирующих организмов, и продукты его распада поглощают свет в красной части спектра, а зеленый свет в основном отражают. Спектральный индикатор содержания хлорофилла *a* в осадке может быть посчитан путем подсчета глубины минимума в районе 670 нм на спектральной кривой (Relative absorption band depth – RABD670) или площади фигуры, образуемой этим минимумом (Relative absorption band area – RABA670) (Rein and Sirocko, 2002). Ряд исследований приводит крайне высокие коэффициенты корреляции между этими параметрами и концентрациями хлорофилла *a*, измеренной напрямую с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (Wolfe et al., 2006). Общий подход состоит в том, что осадки с большим содержанием органического вещества будут иметь более высокие значения параметров RABD670 или RABA670 по сравнению с осадками преимущественно литогенного происхождения.

В настоящей работе мы рассматриваем потенциал спектральных производных хлорофилла *a* отражать вариации содержания органического вещества и автохтонной продуктивности в керне озера Хорлакель. Для этого мы провели корреляционный и многофакторный анализы набора данных, включающего значения параметров RABD670 и RABA670, концентрации элементов, полученные с помощью микро-РФА анализа, результаты лабораторных анализов (потери при прокаливании, магнитная восприимчивость, гранулометрический состав) – отдельно для данных высокого и низкого разрешения.

Результаты говорят об устойчивой связи наших спектральных индексов и других известных биогенных индикаторов. В частности, нами было

установлено, что параметры RABD670 или RABA670 статистически значимо связаны с концентрацией брома в осадке – другим биогенным индикатором, который ранее был использован нами для реконструкции теплообеспеченности на Кавказе с высоким разрешением (Alexandrin et al., 2023). Также статистически значимые положительные связи отмечены для соотношения некогерентного/когерентного рассеяния рентгеновских лучей (также используется в качестве косвенного индикатора количества органического вещества) и массовыми потерями при прокаливании (коэффициенты ранговой корреляции Спирмена 0.48-0.77). Кроме того, отмечаются высокие отрицательные значения этих коэффициентов для связи параметров RABD670 или RABA670 и концентраций литогенных элементов и магнитной восприимчивости (-0.62–-0.86)

4. Выводы

Проделанная работа позволяет использовать параметры RABD670 или RABA670 в качестве индикаторов вариаций органического вещества в осадке и автохтонной продуктивности. В случае керна озера Хорлакель временное разрешение для кривых этих параметров составляет менее одного года. Настолько высокое разрешение может реконструкцию отдельных кратковременных событий, расшифровке периодических событий и форсингов, наряду с общими реконструкциями долгопериодной изменчивости.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Авторы благодарят Дмитрия Борисова (ИО РАН) за проведение микро-РФА анализа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Шварев С.В., Александрин М.Ю., Иванов М.М. и др. 2023. Реконструкция особенностей формирования стока наносов на водосборе оз. Хорлакель (северный Кавказ) за последние 8 тыс. лет (по геоморфологическим и лито-стратиграфическим данным). Геоморфология и палеогеография 3: 81-107. DOI: [10.31857/S2949178923020081](https://doi.org/10.31857/S2949178923020081)

Alexandrin M.Y., Solomina O.N., Darin A.V. 2023. Variations of heat availability in the Western Caucasus in the past 1500 years inferred from a high-resolution record of bromine in the sediment of Lake Karakel. Quaternary International 664: 20-32.

Rein B., Sirocko F. 2002. In-situ reflectance spectroscopy-analysing techniques for high-resolution pigment logging in sediment cores. International Journal of Earth Sciences 91: 950-954.

Wolfe A.P., Vinebrooke R.D., Michelutti N. et al. 2006. Experimental calibration of lake-sediment spectral reflectance to chlorophyll a concentrations: methodology and paleolimnological validation. *Journal of Paleolimnology* 36: 91-100. DOI: [10.1007/s10933-006-0006-6](https://doi.org/10.1007/s10933-006-0006-6)

About the possible existence of the Selizharovo proglacial lake

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Baranov D.V.*, Panin A.V., Karpukhina N.V.

Institute of geography RAS, Moscow, Russia

ABSTRACT. The formation of the incision valley near Selizharovo is associated with the existence of a proglacial lake in the Late Valdai. Geological and hypsometric data indicate its possible level is not lower than 205 m and not higher than 210 m asl. However, at this level of the lake, a incision would not be possible, since the edges of the valley are located at an altitude of 215 – 220 m asl. We assume that the depression at Selizharovo already existed by the beginning of the Late Valdai, and then it deepened and was renewed.

Keywords: Volga River, incision valley, Proglacial Lake, Late Valdai glaciation

For citation: Baranov D.V., Panin A.V., Karpukhina N.V. About the possible existence of the Selizharovo proglacial lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 234-238. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-234

1. Introduction

The morphology of the Volga River valley south of Selizharovo (Tver region) is most characteristic of incision valleys – narrow and deep sections of river valleys crossing the entire width of the hill (Shchukin, 1980). The Volga River valley in this area is a trough-shaped depression with steep sides about 10 m high and a flat, swampy bottom (Baranov et al., 2020). The Svine Gory upland, cut through by a valley, is a glacial and water-glacial plain with heights of 250 – 270 m asl (Stolyarova et al., 1958). Some researchers (Chebotareva et al., 1961) considered the spaces adjacent to the Volga River valley near Selizharovo as kame terraces.

It is assumed that the formation of this incision valley is associated with the descent of a proglacial lake during the degradation of the last glaciation (Panin et al., 2021; Baranov, 2023). Its maximum boundary was located several kilometers north of Selizharovo (Karpukhina et al., 2020). However, there is currently no sufficiently substantiated evidence for the existence of a lake reservoir near Selizharovo in the Late Valdai, the descent of which could form an incision valley.

2. Materials and methods

We used field observations obtained during expeditions of the Institute of Geography of the RAS

near Selizharovo in 2017 – 2020. We also used a significant amount of stock geological data obtained from Russian Federal Geological Foundation (Stolyarova et al., 1958). To model the levels of the hypothetical Selizharovo Proglacial Lake, we used the digital terrain model FABDEM V1-2 (Neal and Hawker, 2023).

3. Results and Discussion

The current drainage threshold of the Upper Volga lakes and Seliger basin – the bed of the Volga River near Selizharovo – is located at 198 m asl. The flat bottom of the trough-shaped valley has a height of about 205 m asl, lined with thin alluvium from the time of degradation of the Late Valdai glaciation (Panin et al., 2021, Baranov, 2023). Accordingly, for the formation of an incision valley, the level of the supposed periglacial lake must exceed the level of the valley bottom (flow threshold) of 205 m abs. According to geological survey data (Stolyarova et al., 1958) and some published data (Karpukhina et al., 2020), it has been established that above 210 m asl from the surface, as a rule, Moscow glacial deposits (till) occur, in places covered by a thin cover aeolian sandy loams, widespread in the Upper Volga river basin (Baranov et al., 2021). Thus, the level of the Selizharovo Proglacial Lake could not be lower than 205 m and higher than 210 m asl (without glacial isostatic adjustment). Considering that, the edges of the incision valley near Selizharovo

*Corresponding author.

E-mail address: dm_baranov@igras.ru (D.V. Baranov)

Received: June 07, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



are located at altitudes of 215 – 220 m asl, then at this level of the periglacial lake there should already have been some kind of depression in the landscape.

An assessment of the planned position of the lake with such a level (205 – 210 m asl) shows (Fig. 1) that it was a single basin covering the modern Upper Volga lakes and Seliger. Work with stock geological materials (Stolyarova et al., 1958) made it possible to establish that at altitudes from 202 to 210 m asl north and northwest of Selizharovo, at the landscape depressions along the Volga and Selizharovka rivers, sandy or sand-gravel deposits occur on the surface, underlain by band clays. Detailed work (Karpukhina et al., 2020) in the Sizhina River valley (north of Selizharovo), falling into the water area of this supposed lake, showed that a large depression of the Moscow glacial landscape was filled with glaciolacustrine and lacustrine sediments of the Late Moscow – Early Valdai time, and then worked out by alluvial processes in the Middle and Late Valdai. Work on Lake Seliger (Konstantinov et al., 2021) has established that its lake stage began only 14–15 ka, and before that, a significant part of the modern lake was a river system.

4. Conclusions

Available geological data indicate the absence of lacustrine and glaciolacustrine sedimentation in the Selizharovo region in the Late Valdai. An analysis of topography showed that the lowest place (and therefore the place where runoff is concentrated) is the section of the modern Volga River valley near Selizharovo. It can be assumed that by the beginning of the Late Valdai there was already some kind of depression in the landscape, and the concentration of runoff, enhanced by the time of climate-induced high water content (Panin and Matlakhova, 2015), became the reason for the deepening and renewal of this breakthrough valley. Incision to the modern level continued in the Holocene (Panin et al., 2021; Baranov, 2023), which means that the longitudinal profile of the river continues to be developed. This fact, as well as the absence in the valley of sediments older than the Late Valdai, indicates the youth of this section of the valley, which confirms the hypothesis that the basin of the Upper Volga lakes and Seliger joined the Volga system in the Late Valdai.

Acknowledgements

This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2024-554 from 24.04.2024).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Baranov D.V., Karpukhina N.V., Mukhametshina E.O. et al. 2021. Cover sandy loams of the Upper Volga River region: Geography, genesis, age. In: Panin A.V. et al. (Ed.)

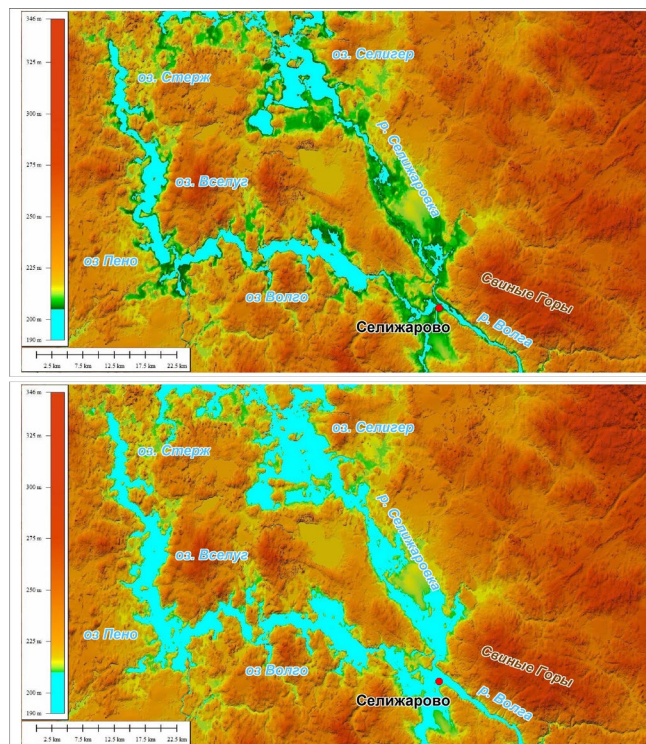


Fig.1. Hypothetical position of the Selizharovo Proglacial Lake with a level of 205 m asl (top) and 210 m asl (below) on a digital terrain model (Neal and Hawker, 2023).

“Directions of evolution geography – 2021” Issue 2. Moscow, pp. 757-760. (in Russian)

Baranov D.V., Karpukhina N.V., Panin A.V. et al. 2020. “Selizharovo sandur” and the Volga River valley. Landscape and quaternary deposits of Arctic, Subarctic and NW Russia 7: 269-273. DOI: [10.24411/2687-1092-2020-10743](https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10743)

Baranov D.V. 2023. River valleys evolution in periglacial area of the Late Valdai sheet SE sector. PhD Thesis. Lomonosov Moscow State University, Russia.

Karpukhina N.V., Pisareva V.V., Zyuganova I.S. et al. 2020. New data about the section stratigraphy near Kileshino (Tver oblast, Russia) – the key for understanding boundaries of glaciations on the Valdai Hills in the Upper Pleistocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* 84 6: 874 – 887. DOI: [10.31857/S2587556620060060](https://doi.org/10.31857/S2587556620060060)

Konstantinov E.A., Panin A.V., Karpukhina N.V. et al. 2021. The Riverine Past of Lake Seliger. *Water Resources* 48 5: 635 – 645. DOI: [10.1134/S0097807821050110](https://doi.org/10.1134/S0097807821050110)

Neal J., Hawker L. 2023. FABDEM V1-2. DOI: [10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn](https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn)

Panin A., Baranov D., Moska P. et al. 2021. The Upper Volga River in MIS 2 – early Holocene: response to climate changes and ice sheet impact. FLAG Biennial Meeting 2021. Evolution of fluvial systems at different time scales. Moscow: Institute of Geography RAS, pp. 54 – 56.

Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20ka and its palaeohydrological implications. *CATENA* 130: 46-61. DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016).

Stolyarova T.I., Gotfrid B.A., Simonova G.F. et al. 1958. Report of the Selizharovo geological survey party (Ostashkov detachment) on the complex geological survey of the 1:200 000 scale, sheet O-36-XXVIII. Moscow: GUCR.

Chebotaeva N.S., Nedoshivina M.A., Stolyarova T.I. 1961. Moscow-Valdai (Mikulino) interglacial deposits in the Upper Volga basin and their significance for paleogeography. *Byull. Komis. po Izuch. Chetvert. Perioda* 26: 35-49.

Shchukin I.S. 1980. Four-language encyclopedic dictionary of terms in physical geography. Moscow: Soviet encyclopedia.

О возможном существовании Селижаровского приледникового озера

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Баранов Д.В.*, Панин А.В., Карпущина Н.В.

Институт географии РАН, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. Образование долины прорыва у пгт Селижарово связывают с существованием приледникового озера в позднем валдае. Геологические и гипсометрические данные указывают на его возможный уровень не ниже 205 м и не выше 210 м абс. Однако при таком уровне озера прорыв не был бы возможен, так как бровки долины располагаются на высоте 215 – 220 м абс. Предполагается, что понижение у пгт Селижарово к началу позднего валдая уже существовало, а затем произошло его углубление и обновление.

Ключевые слова: Волга, долина прорыва, приледниковое озеро, Селижарово, поздний валдай

Для цитирования: Баранов Д.В., Панин А.В., Карпущина Н.В. О возможном существовании Селижаровского приледникового озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 234-238. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-234

1. Введение

Морфология долины р. Волги на южной окраине пгт Селижарово (Тверская область) наиболее характерна для долин прорыва – узких и глубоких участков речных долин, пересекающих возвышенность во всю ширину (Щукин, 1980). Долина р. Волги на этом участке представляет собой корытообразное понижение с крутыми бортами высотой порядка 10 м и плоским заболоченным днищем (Баранов и др., 2020). Возвышенность Свиные Горы, прорезаемая долиной, представляет собой ледниковую и водно-ледниковую равнину с высотами 250 – 270 м абс. (Столярова и др., 1958). Часть исследователей (Чеботарёва и др., 1961) рассматривали примыкающие к долине р. Волги у пгт Селижарово пространства в качестве камовых террас.

Предполагается, что формирование этой долины прорыва связано со спуском приледникового озера во время деградации последнего оледенения (Panin et al., 2021; Баранов, 2023), максимальная граница которого располагалась в нескольких километрах к северу от пгт Селижарово (Карпущина и др., 2020). Тем не менее, достаточно обоснованных свидетельств существования озёрного водоёма в окрестностях Селижарово в позднем валдае, спуск которого мог бы сформировать долину прорыва, в настоящее время не существует.

2. Материалы и методы

В основу исследования положены полевые наблюдения, полученные в ходе экспедиций Института географии РАН в окрестностях пгт Селижарово в 2017 – 2020 гг. Также был использован значительный объём фондовых геологических данных, полученных в Росгеолфонде (Столярова и др., 1958). Для моделирования уровней гипотетического Селижаровского приледникового озера использовалась цифровая модель местности FABDEM V1-2 (Neal and Hawker, 2023).

3. Результаты и их обсуждение

Современный порог стока бассейна Верхневолжских озёр и Селигера – русло р. Волги у пгт Селижарово – располагается на высоте 198 м абс. Плоское днище корытообразной долины прорыва имеет высоту около 205 м абс, высланное маломощным аллювием времени деградации поздневалдайского оледенения (Panin et al., 2021, Баранов, 2023). Соответственно, для формирования долины прорыва уровень предполагаемого приледникового озера должен превышать уровень днища долины (порога стока) в 205 м абс. Согласно данным геологической съёмки (Столярова и др., 1958) и некоторых опубликованных данных (Карпущина

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dm_baranov@igras.ru (Д.В. Баранов)

Поступила: 07 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



и др., 2020) установлено, что выше 210 м абс. с поверхности залегают, как правило, ледниковые отложения (морена) московского возраста, местами перекрытые маломощным покровом эоловых супесей, широко распространённых в верховье Волги (Баранов и др., 2021). Таким образом, уровень Селижаровского приледникового озера не мог быть ниже 205 м и выше 210 м абс. (без учёта гляцио-зостатического воздействия). Учитывая, что бровки долины прорыва у Селижарово расположены на высотах 215 – 220 м абс., то при таком уровне приледникового озера здесь уже должно было существовать какое-либо понижение в рельефе.

Оценка планового положения озера с таким уровнем (205 – 210 м абс.) показывает (рис 1), что оно представляло собой единый бассейн, охватывающий современные Верхневолжские озёра и Селигер. Работа с фондовыми геологическими материалами (Столярова и др., 1958) позволила установить, что на высотах от 202 до 210 м к северу и северо-западу от пгт Селижарово по понижениям рельефа вдоль рек Волги и Селижаровки залегают с поверхности песчаные или песчано-гравийные отложения, подстилаемые ленточными глинами. Детальные работы (Карпущина и др., 2020) в долине р. Сижины (к северу от пгт Селижарово), попадающей в акваторию этого предполагаемого озера, показали, что крупное понижение московского ледникового рельефа заполнено озерно-ледниковыми и озёрными отложениями позднемосковско-ранневалдайского возраста, а затем проработано аллювиальными процессами в среднем и позднем валдае. Работами на озере Селигер (Константинов и др., 2021) установлено, что его озёрный этап начался лишь с 14 – 15 тыс. лет, а до этого значительная часть современного озера представляла собой речную систему.

4. Выводы

Имеющиеся геологические данные указывают на отсутствие озёрного и озёрно-ледникового осадконакопления в районе пгт Селижарово в позднем валдае. Анализ рельефа территории показал, что наиболее низким местом (а значит местом концентрации стока) является участок современной долины р. Волги у пгт Селижарово. Можно предположить, что здесь к началу позднего валдая уже существовало какое-либо понижение рельефа, а концентрация стока, усиленная временем климатически обусловленной многоводности (Panin and Matlakhova, 2015) стала причиной углубления и обновления этой долины прорыва. Врезание до современного уровня продолжилось и в голоцене (Panin et al., 2021; Баранов, 2023), значит продольный профиль реки продолжает вырабатываться. Этот факт, а также отсутствие в долине более древних, чем поздневалдайские, отложений, свидетельствует о молодости этого участка долины, что подтверждает гипотезу о присоединении бассейна Верхневолжских озёр и Селигера к системе Волги в позднем валдае.

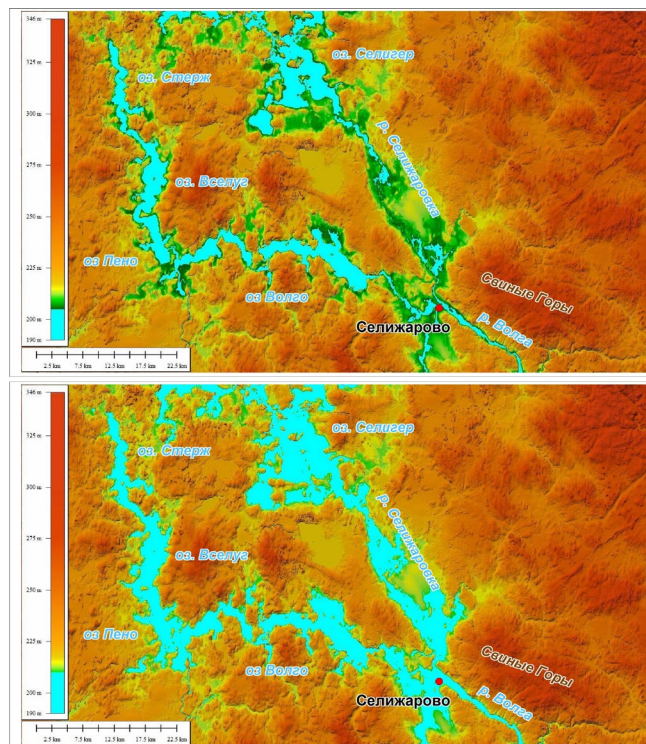


Рис.1. Гипотетическое положение Селижаровского приледникового озера с уровнем 205 м абс. (вверху) и 210 м абс. (внизу) на цифровой модели местности (Neal and Hawker, 2023).

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Баранов Д.В., Карпущина Н.В., Мухаметшина Е.О. и др. 2021. Покровные супеси Верхневолжья: распространение, происхождение, возраст. В: Панин А.В. и др. (ред.), «Пути эволюционной географии – 2021» Том 2. Москва, С. 757-760.

Баранов Д.В., Карпущина Н.В., Панин А.В. и др. 2020. «Селижаровский зандр» и долина реки Волги. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России 7: 269 – 273. DOI: [10.24411/2687-1092-2020-10743](https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10743)

Баранов Д.В. 2023. Развитие речных долин в приледниковой области юго-восточного сектора поздневалдайского ледникового щита. Автореферат дисс. ... к.г.н. МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Карпущина Н.В., Писарева В.В., Зюганова И.С. и др. 2020. Новые данные по стратиграфии разреза у д. Килешино (Тверская область) – ключ к пониманию границ оледенений на Валдайской возвышенности в верхнем неоплейстоцене. Известия Российской академии наук. Серия географическая 84 6: 874 – 887. DOI: [10.31857/S2587556620060060](https://doi.org/10.31857/S2587556620060060)

Константинов Е.А., Панин А.В., Карпухина Н.В. и др. 2021. Речное прошлое озера Селигер. *Водные ресурсы* 48 5: 481 – 491. DOI: [10.31857/s0321059621050114](https://doi.org/10.31857/s0321059621050114)

Столярова Т.И., Готфрид Б.А., Симонова Г.Ф. и др. 1958. Отчёт Селижаровской ГСП (Осташковский отряд) о комплексной геологической съёмке масштаба 1:200 000 листа О-36-XXVIII. М: ГУЦР.

Чеботарёва Н.С., Недошивина М.А., Столярова Т.И. 1961. Московско-валдайские (микулинские) межледниковые отложения в бассейне Верхней Волги и их значение для палеогеографии. *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода* 26: 35-49.

Щукин И.С. 1980. Четырёхязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии. Москва: «Советская Энциклопедия».

Neal J., Hawker L. 2023. FABDEM V1-2. DOI: [10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn](https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn)

Panin A., Baranov D., Moska P. et al. 2021. The Upper Volga River in MIS 2 – early Holocene: response to climate changes and ice sheet impact. FLAG Biennial Meeting 2021. Evolution of fluvial systems at different time scales. Moscow: Institute of Geography RAS, pp. 54 – 56.

Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20ka and its palaeohydrological implications. *CATENA* 130: 46-61. DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)

Reconstruction of the geochemical evolution of the saline lake Shira (Southern Siberia, Russia) in the late Holocene

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Amosova A.A.*, Chubarov V.M., Bezrukova E.V.

Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Favorsky St., 1A, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. The paper presents reconstruction of the geochemical evolution of the saline lake Shira (South Siberia, Russia) over the past 3000 years based on the elemental composition of bottom sediments. Based on the rock-forming element contents obtained by X-ray fluorescence analysis, the main geochemical indices were calculated to assess the degree of deformation and weathering of the rocks in the catchment basin, paleosalinity, paleoclimate, paleoproductivity and input of clastic materials. Changes in Al_2O_3 and TiO_2 contents reflect the influence of the terrigenous contribution in the lake basin and demonstrate four decreases in the terrigenous removal contribution in the age intervals of 40-135, 580-800, 1900-2020 and 2780-2850 cal. a BP. These intervals are characterized by decreases of Na_2O , SiO_2 , K_2O and Fe_2O_3 contents and increases of MgO and CaO contents. The deceleration in the processes of physical weathering of terrigenous material from banks into the lake and its removal by watercourses is confirmed by the increase of the paleosalinity index and the decrease of chemical weathering. The four considered intervals are characterized by high values of the Ti/Zr ratio, which corresponds to rocks formed close to the provenance area. For the interval 2780-2850 cal. a BP, the change of the Ti/Zr ratio value is not so contrasting in comparison to the intervals 40-135, 580-800 and 1900-2020 cal. a BP. The mineral composition of the bottom sediments of saline lake Shira corresponds to young and immature clay mineral with a high percentage of primary silicate minerals, formed under cold climate conditions.

Keywords: Bottom sediments, saline lake, geochemical indices, rock-forming elements, wavelength dispersive X-ray fluorescence analysis

For citation: Amosova A.A., Chubarov V.M., Bezrukova E.V. Reconstruction of the geochemical evolution of the saline lake Shira (Southern Siberia, Russia) in the late Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 239-243. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-239

1. Introduction

The study of saline lake sediments makes it possible to assess the changes of environment condition of the catchment basin, especially for contrasting climatic conditions: wet and dry. In terms of their physico-chemical conditions and species composition, salt lakes have a certain proximity to marine ecosystems, but less attention is paid to the study of saline lakes. Sediments of the saline lake Shira with established seasonal sedimentation represent a valuable archive of natural and climate changes of the Holocene on the northern edge of the Altai-Sayan mountain system (Khakass-Minusinsk Hollow, southern Siberia).

2. Material and methods

The saline meromictic lake Shira (354 m a.s.l.) without outflow is located in the “Khakasskii State

Nature Reserve”. The water surface area is 36 km², the Son River flows into the lake from the south, other sources of water are groundwater and precipitation (Kalugin et al., 2013). According to X-ray diffraction analysis, the mineral composition of the terrigenous component is represented by muscovite, albite, clinocllore, anorthite, calcite, calcium sulfate hydrate, ankerite. In 2021 the core with undisturbed structure was taken from a depth of 25.3 m using the UWITEC drilling station (Austria). The age-depth model is based on ¹⁴C dating using accelerator mass spectrometry. To determine the elemental composition of sediments (rock-forming oxides contents), the X-ray fluorescence method was used (Amosova et al., 2019). Values of loss on ignition at 550 °C (LOI⁵⁵⁰), characterizing the organic matter, and loss on ignition at 950 °C (LOI⁹⁵⁰), characterizing the total carbonate and organic matter, were determined by gravimetry.

*Corresponding author.

E-mail address: amosova@igc.irk.ru (A.A. Amosova)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



To assess the degree of alteration and weathering of the rocks, the following geochemical indices were used: CIA (chemical index of alteration), CIW (chemical index of weathering), PIA (plagioclase index of alteration), CPA (chemical proxy of alteration), ICV (index of compositional variation), Ti-index ($(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO})/\text{TiO}_2$), paleosalinity index ($\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 100$), Mg/Ca ratio characterizing paleoclimate, P/Ti and P/Al ratios characterizing paleoproductivity and Ti/Zr ratio as an indicator of input of clastic materials.

3. Results and discussion

The distributions of main rock-forming oxides contents and geochemical indices over the depth of the core sediment section are obtained. High positive values of correlation coefficient ($r_{xy} = 0.90-0.97$) are observed between the contents of K_2O , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 and Al_2O_3 ; K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 and SiO_2 ; TiO_2 , Fe_2O_3 and K_2O . Negative correlations (r_{xy} from -0.83 to -0.89) are observed between Zr and Sr; CaO and Al_2O_3 ; SiO_2 and K_2O ; TiO_2 and CaO ; Fe_2O_3 and CaO ; LOI^{950} and Al_2O_3 ; SiO_2 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 .

The studied core is characterized by significant variations in the contents of rock-forming elements and geochemical indices. There are high correlations between TiO_2 and Al_2O_3 contents ($r_{xy} = 0.96$), that demonstrates four decreases in the terrigenous removal contribution in the lake basin are observed in the age intervals of 40-135, 580-800, 1900-2020 and 2780-2850 cal. a BP. These intervals are characterized by maximum decreases of Na_2O , SiO_2 , K_2O and Fe_2O_3 contents and maximum increases of MgO and CaO contents. The increase of paleosalinity index values for these intervals also confirms the deceleration in the processes of physical weathering of terrigenous material from banks into the lake and its removal by watercourses. The CIA index, as well as the CIW index, confirms the deceleration of chemical weathering in these intervals. It is important to note that the three intervals are 580-800, 1900-2020 and 2780-2850 cal. a BP correspond to the time of accumulation sediments with light color, confirming the lack of organic matter, characteristic of the holomictic state of the lake system and low water level in the lake. This is typical for periods when deep freezing of rocks blocked the flow of groundwater, which led to a drop in the level of the lake Shira (Kalugin et al., 2013). The «youngest» interval of reduced chemical weathering (40-135 cal. a BP) appeared slightly later than the time of formation of the white layers. The Ti/Zr ratio responds to changes of terrigenous material transport; thus, the four considered intervals are characterized by high ratio values, which correspond to rocks formed close to the source area (low water level in the lake). For the interval 2780-2850 cal. a BP the index change is not so contrasting in comparison to the intervals 40-135, 580-800 and 1900-

2020 cal. a BP. According to the Ti/Zr ratio, the rest of the core is characterized by rocks that contain destruction material from the same source, but moved over a long distance.

Between the CIW, PIA and CIA; PIA and CIW; ICV and Ti-index there are high positive correlations ($r_{xy} = 0.92-1.00$), despite the fact that they describe slightly different factors of environmental influence on the process of sediment accumulation. There are negative correlation between the Ti-index, ICV and CIA; CIW and PIA (r_{xy} varies from -0.84 to -0.91). CIA values range from 15 to 44 (average value 33), which correspond to rocks that have not been subjected to chemical weathering and formed in a relatively cold climate. The value of the CIW and PIA increases with the degree of decomposition of the original rocks or sediments; for the studied sediments, these indices, together with the CIA, clearly respond to the four marked intervals of decreasing the degree of weathering of the paleo sources of material. The ICV, like CIA and CIW, reflects the degree of maturity of the fine aluminosilicon clastics entering the sedimentation area. Immature shales with high contents of non-clay silicate minerals have ICV values greater than 1; on the contrary, more mature clayey rocks with a large amount of clay minerals themselves have lower ICV values. The mineral composition of the bottom sediments of saline lake Shira corresponds to young and immature clay mineral with a high percentage of primary silicate minerals, formed under cold climate conditions.

Acknowledgments

The research was performed using equipment of the Joint use center «Isotope-geochemical Research» (Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) with the financial support of the grant from the Russian Science Foundation, grant number 23-17-00067.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Amosova A.A., Chubarov V.M., Pashkova G.V. et al. 2019. Wavelength dispersive X-ray fluorescence determination of major oxides in bottom and peat sediments for paleoclimatic studies. *Applied Radiation and Isotopes* 144: 118-123. DOI:[10.1016/j.apradiso.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.004)
- Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. 2013. Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International* 290-291: 245-252. DOI:[10.1016/j.quaint.2012.09.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016)

Реконструкция геохимической эволюции соленого озера Ши́ра (Южная Сибирь, Россия) в позднем голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Амосова А.А., Чубаров В.М., Безрукова Е.В.

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, г. Иркутск, Фаворского, стр. 1А, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены реконструкции геохимической эволюции соленого озера Ши́ра (Южная Сибирь, Россия) за последние 3000 лет, основанные на элементном составе донных отложений. На основании полученных методом рентгенофлуоресцентного анализа данных о содержаниях породообразующих элементов были рассчитаны основные геохимические индексы для оценки степени деформации и выветривания пород водосборного бассейна, палеосолености, палеоклимата, палеопродуктивности и дальности переноса кластики. Изменения содержания Al_2O_3 и TiO_2 отражают влияние терригенного вклада в бассейне озера и демонстрируют четыре резких снижения в возрастных интервалах 40-135, 580-800, 1900-2020 и 2780-2850 л.н. Для этих интервалов характерны пониженные содержания Na_2O , SiO_2 , K_2O и Fe_2O_3 и повышенные содержания MgO и CaO . Замедление процессов физического выветривания в озеро терригенного материала со склонов и сноса водотоками подтверждается увеличением значений индекса палеосолености и затухания химического выветривания. Для четырех рассматриваемых интервалов характерны высокие значения отношения Ti/Zr , что соответствует породам, образованным вблизи источников сноса. Для интервала 2780-2850 л.н. Изменение отношения Ti/Zr не так контрастно по сравнению с интервалами 40-135, 580-800 и 1900-2020 л.н. Минеральный состав донных отложений озера Ши́ра соответствует молодым и незрелым глинистым породам с высоким процентом первичных силикатных минералов, сформированным в условиях холодного климата.

Ключевые слова: донные отложения, соленое озеро, геохимические индексы, породообразующие элементы, рентгенофлуоресцентный анализ

Для цитирования: Амосова А.А., Чубаров В.М., Безрукова Е.В. Реконструкция геохимической эволюции соленого озера Ши́ра (Южная Сибирь, Россия) в позднем голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 239-243. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-239

1. Введение

Изучение отложений соленых озер позволяет оценить состояние окружающей среды и изменения водосборной площади, особенно для контрастных климатических условий: влажных и засушливых. По своим физико-химическим условиям и видовому составу соленые озера имеют определенную близость к морским экосистемам, однако изучению соленых озер уделяется меньшее внимание. Отложения соленого озера Ши́ра с установленной сезонной слоистостью представляют ценнейший архив природно-климатических изменений голоцена на северной окраине Алтае-Саянской горной системы (Хакасско-Минусинская котловина, Южная Сибирь).

2. Объект и методы исследований

Бессточное, меромиктическое, соленое озеро Ши́ра расположено в Хакасском государственном природном заповеднике на высоте 354 м над у.м. Площадь поверхности озера составляет 36 км², питание озера осуществляется через единственный крупный приток – реку Сон, другими источниками воды являются подземные воды и атмосферные осадки (Kalugin et al., 2013). В 2021 году в самой глубокой части озера (25.3 м) буровой станцией ударно-канатного типа производства UWITEC (Австрия) была пробурена скважина с отбором керна полного профиля донных отложений ненарушенной структуры. Модель возраст-глубина основана на результатах ¹⁴C датирования методом ускорительной

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: amosova@igc.irk.ru (А.А. Амосова)

Поступила: 05 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



масс-спектрометрии. По данным рентгеноструктурного анализа минеральный состав терригенной составляющей представлен мусковитом, альбитом, клинохлором, анортитом, кальцитом, гидратом сульфата кальция, анкеритом. Для определения элементного состава отложений использован метод рентгенофлуоресцентного анализа (Amosova et al., 2019); гравиметрическим методом определены потери при прокаливании при 550 °С (ППП⁵⁵⁰), характеризующие органическую составляющую, и при 950 °С (ППП⁹⁵⁰), характеризующие суммарно карбонатную и органическую составляющие.

Для оценки степени деформации и выветривания породы и изменчивости природной среды оценили ряд геохимических индексов: CIA (индекс химического изменения пород), CIW (индекс химического выветривания), PIA (индекс изменения плагиоклазов), CPA (химический индекс изменения), ICV (индекс изменения состава), Ti-индекс ($(CaO + Na_2O + MgO)/TiO_2$), индекс палеосолености ($MgO/Al_2O_3 \cdot 100$), отношение Mg/Ca характеризующее палеоклимат, отношения P/Ti и P/Al характеризующие палеопродуктивность и отношение Ti/Zr как индикатор дальности переноса кластики.

3. Результаты и обсуждение

Для исследуемого керна характерны заметные вариации содержаний породообразующих элементов и геохимических индексов. Высокие положительные корреляции ($r_{xy} = 0.90-0.97$) наблюдаются между содержаниями K_2O , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 и Al_2O_3 ; K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3 и SiO_2 ; TiO_2 , Fe_2O_3 и K_2O . Отрицательные корреляции (r_{xy} от -0.83 до -0.89) наблюдаются между Zr и Sr; CaO и Al_2O_3 , SiO_2 и K_2O ; TiO_2 и CaO; Fe_2O_3 и CaO; ППП⁹⁵⁰ и Al_2O_3 ; SiO_2 , K_2O , TiO_2 и Fe_2O_3 .

Характерны высокие корреляции содержания TiO₂ и Al₂O₃ ($r_{xy} = 0.96$), которые демонстрируют четыре резких уменьшения вклада терригенного сноса в возрастных интервалах 40-135, 580-800, 1900-2020 и 2780-2850 л.н. Для этих интервалов характерны повышенные значения ППП⁹⁵⁰, MgO и CaO и пониженные содержания Na₂O, SiO₂, K₂O и Fe₂O₃. Резкое увеличение индекса палеосолености для этих интервалов также подтверждает замедление процессов выветривания и поступления в озеро терригенного материала со склонов и снос водотоками. Индексы CIA и CIW подтверждают затухание химического выветривания в этих возрастных интервалах. Важно отметить, что три интервала 580-800, 1900-2020 и 2780-2850 л.н. соответствуют времени аккумуляции бедных органическим веществом «белесых» илов, характерных для голомиктического состояния озерной системы и пониженного уровня воды в озере. Последнее могло возникать, когда глубокое промерзание пород перекрывало приток подземных вод, что приводило к падению уровня озера (Kalugin et al., 2013). Самый «молодой» интервал пониженного химического выветривания (40-135 л.н.) проявился чуть позднее времени формирования «белесых» илов. Отношение Ti/Zr ярко

реагирует на изменение дальности переноса терригенного материала, таким образом, для четырех рассматриваемых интервалов характерны высокие значения отношения, что соответствует породам, образованным недалеко от источников сноса (пониженного уровня воды в озере). Для интервала 2780-2850 л.н. изменение индекса не так контрастно, по сравнению с интервалами 40-135, 580-800 и 1900-2020 л.н. Для остального керна характерны породы, в составе которых присутствует материал разрушения того же источника сноса, но перемещенные на большое расстояние согласно значениям отношения Ti/Zr.

Между индексами CIW, PIA и CIA; PIA и CIW; ICV и Ti-индексом наблюдаются высокие положительные корреляции ($r_{xy} = 0.92-1.00$), несмотря на то, что они описывают несколько различные факторы влияния окружающей среды на процесс накопления отложений. Наблюдается отрицательная корреляция между Ti-индексом, ICV и CIA; CIW и PIA (r_{xy} варьирует от -0.84 до -0.91). Значения индекса CIA изменяются от 15 до 44 (среднее значение 33), что соответствуют не подвергавшимся химическому выветриванию породам, сформированным в условиях относительно холодного климата. Величина индексов CIW и PIA возрастает с ростом степени разложения исходных пород, для изучаемых отложений эти индексы вместе с индексом CIA ярко реагируют на четыре отмеченных интервала уменьшения степени выветрелости материала палеоводосбора. Индекс ICV, как и индексы CIA и CIW, отражает степень зрелости поступающей в область седиментации тонкой алюмосиликокластики. Незрелые глинистые сланцы с высоким содержанием неглинистых силикатных минералов имеют значения индекса ICV более 1; напротив, более зрелые глинистые породы с большим количеством собственно глинистых минералов имеют более низкие величины индекса ICV. Таким образом, минеральный состав донных отложений озера Шира соответствует молодым и незрелым глинистым породам с высоким процентом первичных силикатных минералов, сформированным в условиях холодного климата.

Благодарности

Исследования выполнены с использованием оборудования Центров коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-17-00067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Amosova A.A., Chubarov V.M., Pashkova G.V. et al. 2019. Wavelength dispersive X-ray fluorescence determination of

major oxides in bottom and peat sediments for paleoclimatic studies. *Applied Radiation and Isotopes* 144: 118-123. DOI:[10.1016/j.apradiso.2018.11.004](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.11.004)

Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. 2013. Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International* 290-291: 245-252. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.09.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016)

Palaeosedimentation in Khotavets lake (Mologa-Sheksna lowland) inferred from the results of explicit GPR survey and drilling data



Bobrov N.Yu.^{1*}, Sadokov D.O.^{2,3}, Sapelko T.V.⁴, Terekhov A.V.⁵, Babushkin M.V.⁶, Mukhin A.K.⁶, Beliaeva O.M.¹

¹ St Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7/9, St Petersburg, 199034, Russia

² Shenzhen MSU-BIT University, International University Park Road, 1, Dayun New Town, Longgang District, Shenzhen, Guangdong Province, 518172, P.R. China

³ ITMO University, Lomonosova Str., 9, St. Petersburg, 191002, Russia

⁴ Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, SPC RAS, Sevastianova Str., 9, St Petersburg, 196105, Russia

⁵ Arctic and Antarctic Research Institute, Beringa Str., 38, St Petersburg, 199397, Russia

⁶ Darwin State Nature Biosphere Reserve, vil. Borok, 44, 162723, Russia

ABSTRACT. Late Glacial – Holocene sedimentary record has been obtained from a lake basin at the north of East-European Plain, and AMS¹⁴C-dated. Coring results were coupled with the ground penetrating radar (GPR) survey, which enabled for the sedimentary sequences' chronology to be upscaled for the whole basin and beyond. A prominent peat layer (presumably of Allerød age) has been suggested as a marking horizon to correlate with the Late Glacial lacustrine dynamics in the area. Laminated silt with low organic matter content (of the Younger Dryas age), underlain by sandy silt deposits were discovered both from the boreholes and via the geophysical survey. The lower surface of these strata forms wavy and hummocky bottom relief. Organic muds (accumulated in the Holocene) cover the mineral deposits equally.

Keywords: palaeosedimentation, climatostratigraphy, Mologa-Sheksna lowland, Late Glacial, Holocene, GPR survey

For citation: Bobrov N.Yu., Sadokov D.O., Sapelko T.V., Terekhov A.V., Babushkin M.V., Mukhin A.K., Beliaeva O.M. Palaeosedimentation in Khotavets lake (Mologa-Sheksna lowland) inferred from the results of explicit GPR survey and drilling data // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 244-250. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-244

1. Introduction

Lake Khotavets (N 58.568°, E 37.603°) is located within the Mologa river basin in the Vologda region. The lake is situated at 102.4 m above sea level (a.s.l.), covers an area of 1.24 km² and is an average 2 m depth. Sedimentation history of the Lake Khotavets, and the neighboring lakes and peatbogs, has recently been investigated for (1) stratigraphical evidence of the regional Holocene onset, (2) reconstructing of the short-term Late Glacial climatic changes, and (3) overview of ultimate drainage of large palaeolakes of the central Mologa-Sheksna Lowland (MSL) (Sadokov et al., 2022). Repeated in 2024 field study with accentuated geophysical survey has pursued the idea of delineating the main sedimentary facies bedding, and coinciding of the lake bottom (pre-Holocene) relief with the surrounding basin and peatland landform patterns.

*Corresponding author.

E-mail address: n.bobrov@spbu.ru (N.Yu. Bobrov)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

2. Materials and methods

The GPR survey was carried out on the Lake Khotavets in March 2018 (along 6 profiles), and repeated in January 2024, along regular 13 profiles of west-east direction and 100-m distance between them. The OKO-2 instrument with AB-250 antenna unit (central frequency 250 MHz) was used in 2024, and Triton antenna unit (central frequency 50 MHz) was used in 2018 and 2024. The antenna units were towed by a snowmobile, over the snow-ice lake surface. GPS tracks were synchronously recorded. For each profile performed in 2024, two GPR records (radargrams) were obtained – with a high-frequency unit and with low-frequency unit.

Sampling of the Lake Khotavets sediments was performed in 2018 and 2024, after the GPR survey. Russian corer (chamber length 100 cm, width 5 cm) was

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



used for core extracting. Lithological investigation of the obtained cores was carried out on the site and later repeated in the Institute of Limnology RAS. Age was determined for 7 samples delivered in 2018 by AMS¹⁴C dating procedure (Laboratory of the Radiocarbon Dating and Electronic Microscopy, Institute of Geography RAS, Moscow) and age values were calibrated with the use of IntCal20 calibration curve. Both of the boreholes (2018 and 2024) were performed in the central part of the Lake Khotavets, with the distance 200 m between them.

Correspondence of the radargram boundaries to actual lithological transitions in the core was verified by the core investigation.

3. Results and discussion

Radargrams obtained in 2024 during the GPR survey along the profile that crossed the borehole site, are shown in the Fig. 1. Based on the GPR survey results, a point for coring has been chosen (red vertical line in the Fig. 1).

In the Fig. 1, the outlined intervals represent boundaries between different stratigraphical units. Fig. 2 demonstrates composite core lithology, delineates the GPR units and boundaries, and age control.

Depth of the Lake Khotavets varies across the basin (mean values around 2 m). Boundary (4) denotes transition between Unit III, where weakly decomposed peat was uncovered in the top, and Unit IV (associated with underlying silty or clayey material). Unit IV has not been uncovered in neither of the boreholes. Unit II is separated from Unit III by the boundary (3), and is represented by rhythmically laminated silt with lit-

tle organic matter (OM). Boundary (2) separates Unit I and II, where Unit 1 corresponds to the layer of organic muds. It can be seen that the topography of the boundaries below organic deposits is quite rugged, with depth variations reaching 4 meters. In the right (eastern) part of the profile, in the interval of 700-1050 m, some wide ridge rises almost to the surface, which can also be traced on neighboring profiles. The surface of Unit I is quite flat, which is depicted as boundary (1).

In 2018, a 425-cm-long sediment sequence was retrieved. In 2024, total thickness of the obtained sequence was 280 cm. Lithological correspondence of the sediments of the new sequence (2024) to those of the former one (2018), supported by the GPR data, was used to correlate the sedimentation chronology (Fig. 2). The oldest strata observed in the studied sequences belong to Late Glacial, i.e., Allerød: sandy laminated silt with little OM, in the 2018 sequence, and presumably a peat layer, in the 2024 sequence. Stratified (rhythmic) silt overlays them, and corresponds to the Younger Dryas. Upcore, a sedimentation response to changes in palaeohydrology during the Pleistocene/Holocene transition is noticed within a mixed silty layer with OM content increasing upwards steadily. Finally, highly organic (muddy) deposits on the top of the studied pack accumulated entirely during the Holocene.

It can be noticed that sedimentation was unequal across the lake basin. The bottom relief represents a series of hummocks, ridges and depressions (Fig. 1). Organic mud layer (accumulated during the Holocene) covers the underlying strata as an even sequence from 2.5 m to less than 0.5 m thick, as it can be seen in the right part of the radargram (eastern part of the lake),

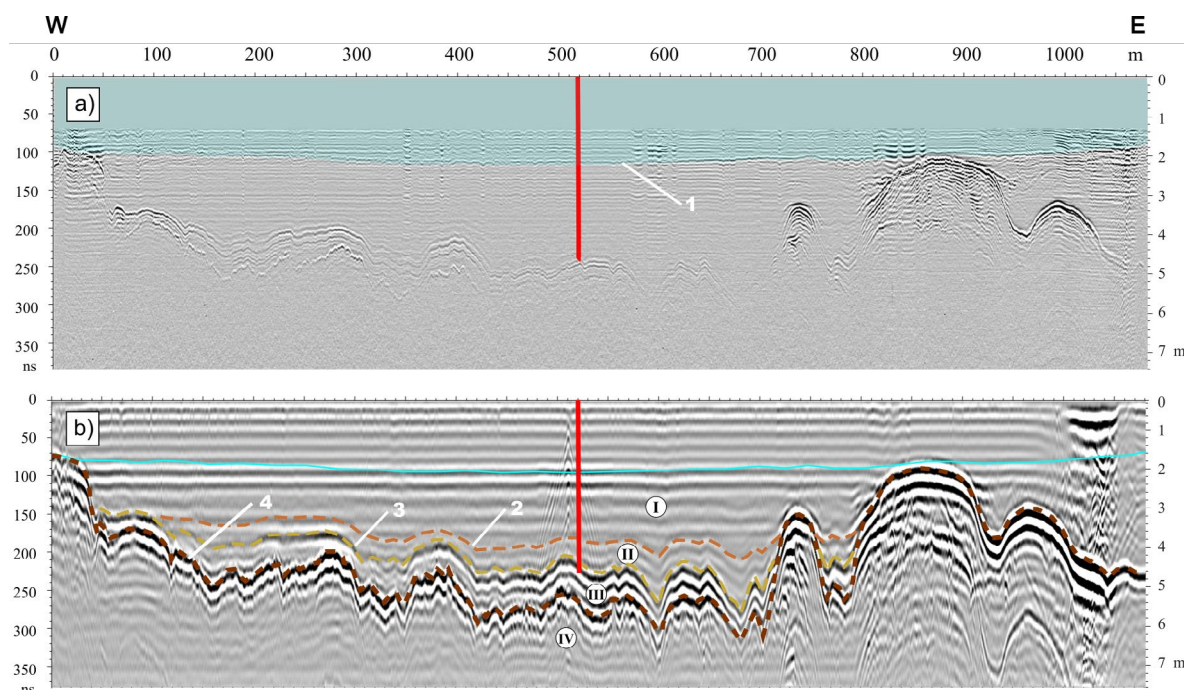


Fig.1. Radargrams along the profile 8, obtained in 2024 with: a) antenna unit AB-250 (250 MHz), b) antenna unit Triton (50 MHz). The place and depth of coring are marked with vertical red line. (1-4) – reflecting boundaries confining stratigraphic units (I-IV). I - gyttja (organic muds), II - layered silt with OM, III – peat and mineral silt (presumably), IV – underlying silty (or clayey) deposits.

where a prominent mound comprised mostly of mineral deposits almost reaches the surface of Holocene deposits.

GPR technique (both 250 MHz and 50 MHz) showed itself highly effective in interpreting the bedding of surficial and subsurficial sediment layers. As supported by the deposition chronology, the layers of mineral silty deposits (Fig. 1) are assumed to have been accumulating during the Late Glacial and up to the Younger Dryas, provided the lake did not drain from the late Allerød till the Holocene onset, and the sedimentation was continuous in the whole basin.

The Allerød age of the peat, retrieved from the depth of 460 cm in 2024, is not confirmed by the direct AMS measurements yet, although its stratigraphical position seems to be undoubtful, because its appearance can be associated with an identical buried peat layer within the thickness of the surrounding lacustrine sand terraces (Sadokov et al., 2024). The buried peat layer is widely presented at the base of aeolian ridges in the central MSL, and denotes regional lake level drop. The peat layer age corresponds to late Allerød – early Younger Dryas (the layer has been dated as 13.4 – 12.2 cal. ka BP at 7 sites in the area) (Sadokov et al., 2024).

Still, it is notable, that no peat layer was found in the sequence obtained in 2018. Bedding of this peat layer is a matter of specific research interest, due to its high relevance for Late Glacial short-term climate oscillation reconstruction. New investigation of its position within the Late Glacial Lake sediments is required, both for in-basin deposits and across the surrounding lacustrine-alluvial plain.

4. Conclusions

GPR survey has provided an insight into the Late Glacial - Holocene palaeosedimentation in the Lake Khotavets supported and verified by the investigation of the core lithology and chronology. High-frequency (250 MHz) GPR technique shows reliable results for delineation of the border of Pleistocene/Holocene deposition change and investigation of thin structures in the top of the Late Glacial silty strata. Low-frequency (50 MHz) GPR survey enabled to identify basin-wide wavy bedding of the Late Glacial silty deposits, which remained uncovered by the drilling. The presence of a peat layer below the Younger Dryas rhythmic sediments is evident of the regional lake level drop during the Allerød, both inside the Lake Khotavets basin, and beyond.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, no. FFZF-2024-0001 and FFZF-2024-0002.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

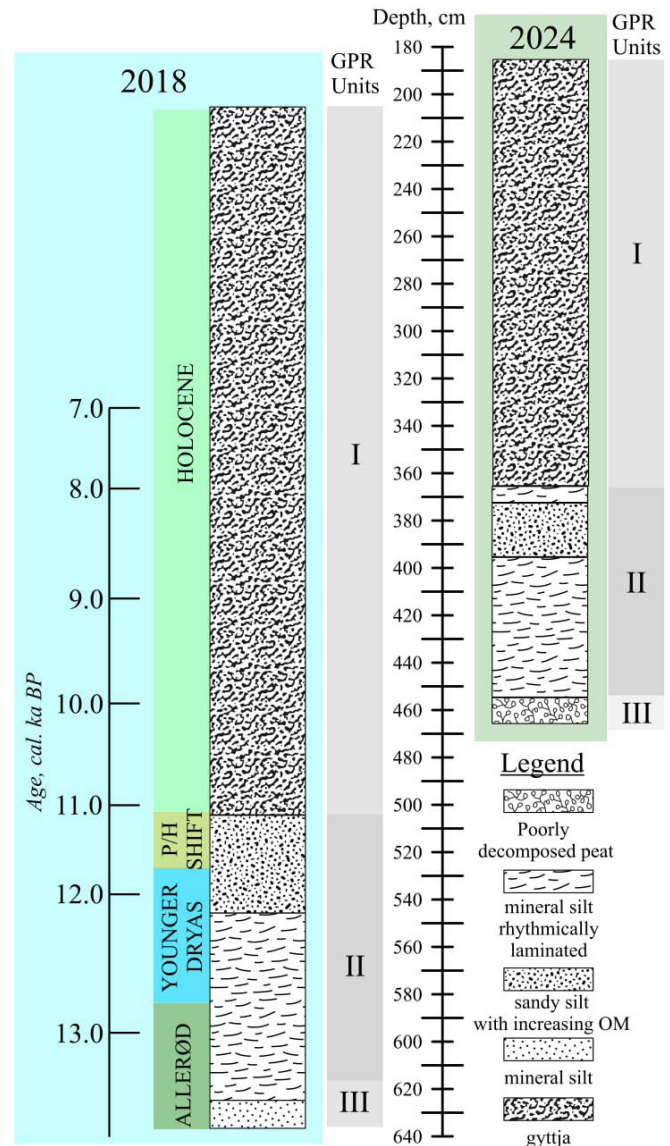


Fig.2. Lithology and chronostratigraphy of the Lake Khotavets sediments. Depth is accounted from ice surface.

References

- Sadokov D., Sapelko T., Fedorov G. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1562-1564. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562).
- Sadokov D., Kostromina N., Mazei N. et al. 2024. Allerød interstadial vegetation and lacustrine palaeoenvironment of the central Mologa-Sheksna Lowland (East-European Plain). In: EGU General Assembly 2024, Austria, EGU24-12877. DOI: [10.5194/egusphere-egu24-12877](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-12877)

Реконструкция палеоседimentации в озере Хотавец (Молого-Шекснинская низменность) по результатам детальной георадиолокационной съемки и бурения донных отложений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYБобров Н.Ю.^{1*}, Садоков Д.О.^{2,3}, Сапелко Т.В.⁴, Терехов А.В.⁵, Бабушкин М.В.⁶, Мухин А.К.⁶, Беляева О.М.¹¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, 199034, Россия² Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне, улица Гоцзидасюэюань, 1, Даюньсиньчэн, район Лунган, Шэньчжэнь, провинция Гуандун, 518172, КНР³ Университет ИТМО, ул. Ломоносова, 9, Санкт-Петербург, 191002, Россия⁴ Институт озероведения Российской Академии наук - Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской Академии наук, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия⁵ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397, Россия⁶ Дарвинский государственный природный биосферный заповедник, дер. Борок, 44, 162723, Россия

АННОТАЦИЯ. Последовательность позднеледниковых и голоценовых отложений была получена из озера Хотавец на севере Восточно-Европейской равнины и датирована (AMS¹⁴C). Результаты бурения были рассмотрены совместно с данными георадиолокационной (ГРЛ) съемки, что позволило привязать и сопоставить разрезы озерных отложений в бассейне озера Хотавец и за его пределами. Отчетливо выделяющийся слой торфа в подошве колонки (вероятно, относящийся к аллерёду) был отмечен как маркирующий горизонт, который можно использовать для корреляции динамики озерного осадконакопления в позднеледниковье в пределах всего региона Молого-Шекснинской низменности. По всей озерной котловине выявлен нерегулярный и изрезанный доголоценовый рельеф дна, сложенный песчано-алевритовыми отложениями, верхняя часть толщи которых имеет ритмично-слоистую текстуру (отложились во время позднего дриаса). Эта литологически выделяющаяся толща была выявлена как по результатам геофизических исследований, так и, частично, в ходе бурения. Органические илы голоценового возраста равномерно перекрывают минеральные отложения.

Ключевые слова: палеоседimentация, климатостратиграфия, Молого-Шекснинская низменность, ранний голоцен, позднеледниковье, георадиолокационная съемка

Для цитирования: Бобров Н.Ю., Садоков Д.О., Сапелко Т.В., Терехов А.В., Бабушкин М.В., Мухин А.К., Беляева О.М. Реконструкция палеоседimentации в озере Хотавец (Молого-Шекснинская низменность) по результатам детальной георадиолокационной съемки и бурения донных отложений // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 244-250. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-244

1. Введение

Озеро Хотавец (N 58,568°, E 37,603°) расположено в бассейне реки Мологи в Вологодской области. Озеро находится на высоте 102,4 м над уровнем моря, занимает площадь 1,24 км² и имеет среднюю глубину 2 м. Исследования истории осадконакопления в озере Хотавец, а также соседних озер и торфяников проводились в целях (1) поиска стратиграфического обоснования наступления голоценового потепления в регионе, (2) реконструкции

краткосрочных климатических изменений в позднеледниковье, (3) определения времени и характера окончательного дренирования крупных палеоозёр в центре Молого-Шекснинской низменности (МШН) (Sadokov et al., 2022). В 2024 году были выполнены повторные детальные геофизические исследования озера с целью оконтуривания залегания основных осадочных фаций и соотнесения доголоценового рельефа дна озера с формами рельефа окружающей местности и торфяников.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: n.bobrov@spbu.ru (Н.Ю. Бобров)

Поступила: 05 июня 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Впервые ГРЛ съемка проводилась на озере Хотавец в марте 2018 г. (по 6 профилям) и, повторно, в январе 2024 г. по 13 регулярным профилям широтного направления с расстоянием между ними 100 м. Использовался георадар ОКО-2 с антенными блоками АБ-250 (центральная частота 250 МГц) – в 2024 г., и «Тритон» (центральная частота 50 МГц) – в 2018 и 2024 гг. Антенные блоки буксировались снегоходом по поверхности снежно-ледового покрова, синхронно записывались GPS-треки. По каждому профилю, выполненному в 2024 году, были получены две ГРЛ записи (радарограммы) – с высокочастотным блоком и с низкочастотным блоком.

Отбор проб донных отложений озера Хотавец проводился в 2018 и 2024 гг. после ГРЛ съёмки. Для извлечения керна использовался полуцилиндрический (русский) торфяной бур (длина пробоотборника 100 см, ширина 5 см). Анализ литологических границ в кернах был проведен на месте отбора, и позднее повторен в Институте озероведения РАН. Возраст был определен для 7 образцов из колонки, отобранной в 2018 г., методом AMS¹⁴C датирования (лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН, Москва), и значения возраста откалиброваны с использованием калибровочной кривой IntCal20. Обе скважины (2018 г. и 2024 г.) были выполнены в центральной части озера Хотавец, на расстоянии 200 м друг от друга.

Соответствие границ, видимых на радарограммах, реальным литологическим границам было подтверждено исследованием отобранных кернов.

3. Результаты и обсуждение

Радарограммы, полученные в ходе ГРЛ съемки 2024 года по профилю, на котором находится скважина, представлены на рис. 1. Точка отбора колонки (отмечена вертикальной красной линией на рис. 1) была выбрана по результатам георадиолокации. На рис. 1 цветными пунктирными линиями выделены границы между различными стратиграфическими подразделениями (слоями). На рис. 2 представлена сводная литологическая колонка, обозначены выделенные по ГРЛ данным слои и границы, а также возрастная привязка.

Глубина озера Хотавец в пределах котловины неодинакова (средние значения около 2 м). Граница (4) маркирует переход от слоя III, в верхней части которого вскрыт торф низкой степени разложения, к слою IV (сопоставляется с подстилающим алевритовым или глинистым материалом). Слой IV не был вскрыт ни в одной из скважин. Слой II отделяется от слоя III границей (3), и представлен ритмично слоистым алевритом с низким содержанием органического вещества (ОВ). Граница (2) разделяет слои I и II, где слой I соответствует толще органических илов. Рельеф границ под органическими отложениями достаточно изрезан, перепады глубин достигают 4 м. В правой (восточной) части профиля, в интервале 700-1050 м, к поверхности поднимается широкая гряда, которая прослеживается и на соседних профилях. Поверхность слоя I достаточно ровная, как видно по отображению границы (1).

В 2018 г. была отобрана колонка общей мощностью 425 см, в 2024 г. – 280 см. Литологическое соответствие отложений новой (2024 г.) и предыдущей (2018 г.) колонки, подтвержденное ГРЛ

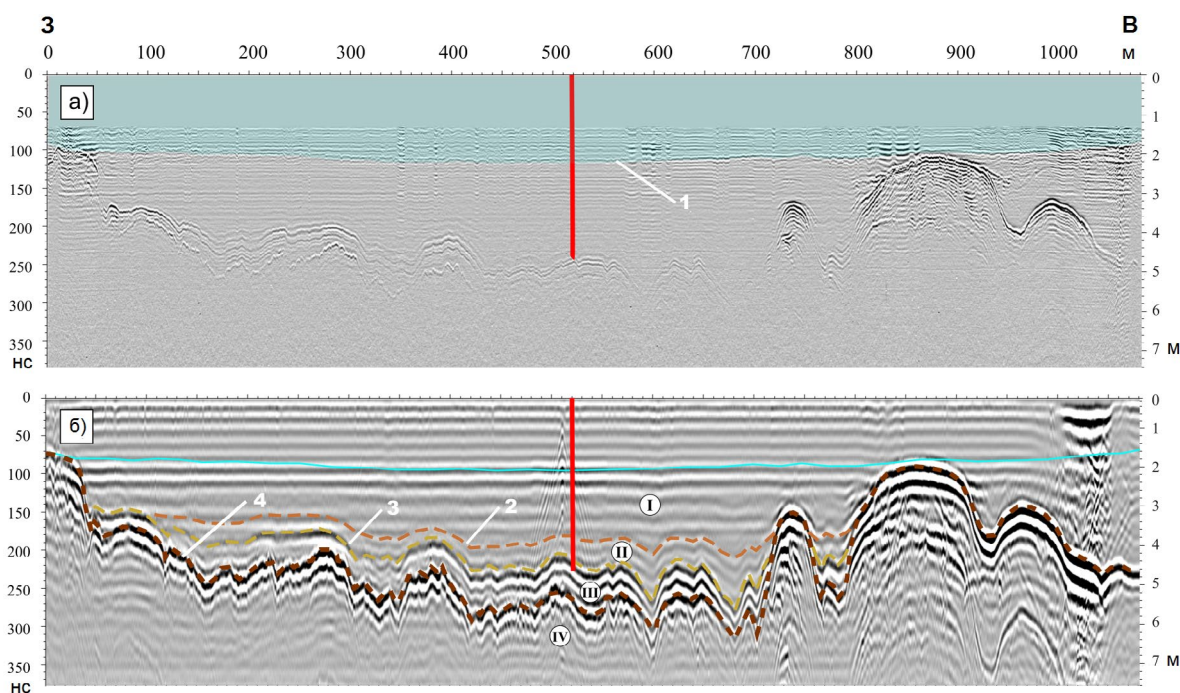


Рис.1. Радарограммы по профилю 8, полученные в 2024 г.: а) с антенным блоком АБ-250 (250 МГц), б) с антенным блоком Тритон (50 МГц). Место и глубина отбора колонки в 2024 г. отмечены вертикальной красной линией. (1-4) – отражающие границы между стратиграфическими подразделениями (I-IV). I – органический ил, II – слоистый алеврит с ОВ, III – торф и алеврит (предположительно), IV – подстилающие отложения, предположительно, глинисто-алеваитового состава.

данными, было использовано для корреляции хронологии седиментации (рис. 2). Наиболее древние отложения, вскрытые скважинами, относятся к позднеледниковью, а именно, к аллерёду: опесчаненный слоистый алеврит с низким содержанием ОВ (в колонке 2018 г.) и, предположительно, слой торфа (в колонке 2024 г.). Их перестилают стратифицированные (ритмично-слоистые) алевриты, относящиеся к позднему дриасу. Фация переходного седиментационного режима, отражающая палеогидрологические изменения по мере наступления голоцена, прослеживается в виде алевритовой толщи с возрастающим содержанием ОВ вверх по колонке. Выскооорганические (илистые) отложения в верхней части обеих исследованных колонок полностью сформировались в голоцене.

Можно заметить, что седиментация в пределах озёрной котловины была неравномерной. Рельеф дна представляет собой последовательность поднятий, гряд и впадин (рис. 1). Толща органического ила (накопившегося в голоцене) мощностью от 2,5 м до 0,5 м равномерно покрывает нижележащие слои, как это видно в правой части радарограммы (восточная часть озера), где выделяется гряда, состоящая, в основном, из минеральных отложений, которая почти достигает поверхности голоценовых осадков.

Метод ГРЛ (при сочетании высокочастотной и низкочастотной антенн) показал себя высокоэффективным при исследовании залегания как поверхностных, так и более глубоких слоев озёрных отложений. В соответствии с хронологией осадконакопления предполагается, что толща алевритовых осадков (рис. 1) формировалась в течение позднеледниковья и вплоть до позднего дриаса, при этом озеро полностью не высыхало с конца аллерёда до начала голоцена, а седиментация была непрерывной по всему бассейну.

Аллерёдовый возраст торфа, извлеченного с глубины 460 см в 2024 г., пока не подтвержден прямыми измерениями AMS¹⁴C, однако его стратиграфическое положение может быть уверенно сопоставлено с идентичным погребенным торфяным слоем в толще окружающих озерных песчаных террас (Sadokov et al., 2024). Этот погребённый торфяной горизонт широко представлен в основании эоловых гряд в центре МШН, и маркирует региональный эпизод спада уровня крупного палеозера. Время его возникновения было определено между 13.4 и 12.2 кал.тыс.л.н. (конец аллерёда – начало позднего дриаса) в 7 точках области исследований (Sadokov et al., 2024).

Примечательно, что в разрезе, полученном в 2018 году, слой торфа не был обнаружен. Его наличие и конфигурация залегания в МШН имеют большое значение для реконструкции краткосрочных колебаний климата в позднеледниковье. Требуется дополнительные исследования его положения в позднеледниковых озерных отложениях как внутри современных озёрных котловин, так и на окружающей озерно-аллювиальной равнине.

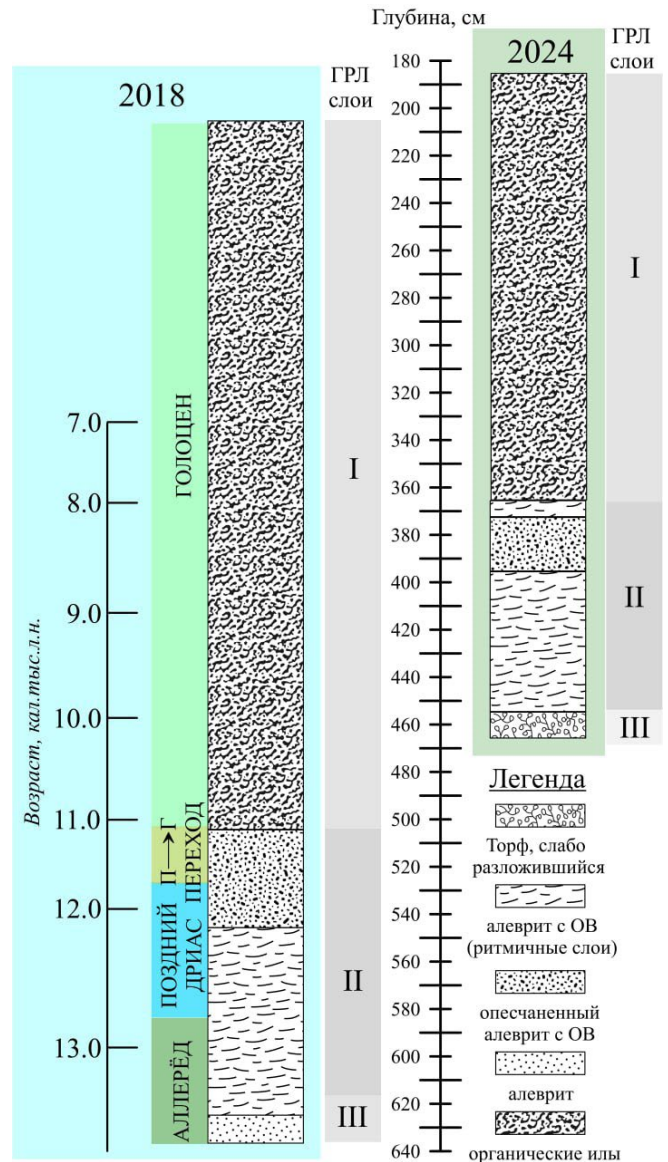


Рис.2. Литология и хроностратиграфия отложений озера Хотавец. «П → Г переход» - переходный горизонт от плейстоцена к голоцену. Глубина указана от поверхности льда.

4. Заключение

ГРЛ съемка позволила получить представление о позднеледниково-голоценовой палеоседиментации в озере Хотавец, подтвержденное исследованием литологии и хронологии колонок. Высокочастотные (250 МГц) ГРЛ измерения дают надежные результаты для прослеживания границы плейстоцен/голоцен и изучения тонких структур в верхней части алевритистых позднеледниковых осадков. Низкочастотная (50 МГц) ГРЛ съемка позволила выявить по всей озёрной котловине волнистое залегание алевритистых позднеледниковых отложений, не пройденных бурением. Наличие слоя торфа под ритмичными отложениями позднего дриаса свидетельствует о падении уровня регионального водоёма во время аллерёда как внутри бассейна озера Хотавец, так и за его пределами.

Исследование выполнено в рамках госзадания Института озераведения Российской Академии наук, обособленного подразделения Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской Академии наук, № FFZF-2024-0001 и FFZF-2024-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Sadokov D., Sapelko T., Fedorov G. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1562-1564. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562)

Sadokov D., Kostromina N., Mazei N. et al. 2024. Allerød interstadial vegetation and lacustrine palaeoenvironment of the central Mologa-Sheksna Lowland (East-European Plain). In: EGU General Assembly 2024, Austria, EGU24-12877. DOI: [10.5194/egusphere-egu24-12877](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-12877)

Holocene geochemical record of Lake Kasplya (Smolensk oblast, Russia) bottom sediments and its interpretation

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYAndreev R.A.^{1,2*}, Shasherina L.V.², Konstantinov E.A.², Manakova O.I.¹¹Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119234, Russia²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny per. 29, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. This research focuses on the reconstruction of Lake Kasplya (Smolensk oblast) history in Holocene based on the interpretation of the bulk inorganic and organic geochemistry records. We derived bulk inorganic geochemistry for the lake bottom sediment record using X-ray fluorescence and conducted a principal component analysis (PCA) using geochemistry and lithogenic data. Based on PCA, we obtained a three-component model, which describes 73% of the variance. Each component represents a factor that contributes to the geochemical and lithogenic records: lithogenic, chemically altered matter, and organic matter inputs to the lake.

Keywords: palaeolimnology, X-ray fluorescence (XRF), principal component analysis (PCA), lake sediments

For citation: Andreev R.A., Shasherina L.V., Konstantinov E.A., Manakova O.I. Holocene geochemical record of Lake Kasplya (Smolensk oblast, Russia) bottom sediments and its interpretation // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 251-255. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-251

1. Introduction

For reconstructing the sediment history of lakes, bulk inorganic and organic geochemistry are important palaeolimnological proxies. Located in the Valdai (Late Pleistocene) glacier marginal zone, at the intersection of the Dnieper and Zapadnaya Dvina river basins, Lake Kasplya is an open-basin lake 35 km northwest of Smolensk, Western Russia (Smolensk-Moscow uplands). Especially in relation to the Dnieper basin, the basin history of the lake is not well understood. Further regional palaeogeographic studies could benefit from the reconstruction of Kasplya's palaeohydrological features using geochemistry data. Our research aims to investigate and to make a reconstruction of factors that regulated geochemical record of the sediments in Kasplya Lake during its Holocene history.

2. Materials and methods

Our key site is Lake Kasplya, with 3.45 km² of surface area, 585 km² of basin area, and a maximum water depth of 3.2 m. The lake basin is open, with the Kasplya river as an outflow and one inflow river, the Klyots. The majority of the sediments in the basin are sands and glacial tills from the Late Pleistocene, which are arranged in outwash plains and moraine hills, respectively.

*Corresponding author.

E-mail address: dorionio40@gmail.com (R.A. Andreev)

Received: June 08, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

Lake bottom sediment core (Kas-17, 17.3 m) was obtained during February 2022 using a modified Livingstone piston corer. The deepest southwest section of the lake is where the core site is situated. Cores were sampled and analyzed in the Institute of Geography RAS Environmental Palaeoarchives Laboratory with a 0.1 m sample resolution.

The core was dated using radiocarbon accelerated mass spectrometry techniques (10 dates, below 9.5 m of core) and liquid scintillation (LSC, 6 dates, down to 9.5 m). AMS radiocarbon dating were conducted in Center of Common Use "Laboratory of Radiocarbon Dating and Electronic Microscopy" of the Institute of Geography RAS (Moscow). LSC radiocarbon dating were made in Laboratory of Geomorphological and Palaeogeography of Polar Countries and World Ocean Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University. Using the rbacon (Blaauw and Christen, 2011) R package, a Bayesian approach was used to calculate the sediment chronology for a thickness of 0.1 m.

Bulk inorganic geochemistry analysis (36 inorganic elements) was elaborated with Spectroscan MAKS-GVM by the standard soil sample procedure (GOST 33850-2016). Organic matter concentration: total organic carbon (TOC), total nitrogen and phosphorus were obtained with dry combustion technique with CHNS-analyzer Vario Isotope Cube (Elementar) in Center of Common Use "Laboratory of Radiocarbon

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Dating and Electronic Microscopy” of the Institute of Geography RAS.

To prepare XRF data for statistical analysis, we center-log transformed (clr) element intensities by formula (given in Weltje et al., 2015). Next, we used variable scaling principal component analysis (PCA) to interpret the lake geochemistry record. As variables for PCA, we used 36 variables, including 22 clr-transformed inorganic and organic elements (the last includes total organic carbon (TOC) and N) and one geochemical ratio (TOC/N). Other variables are additional lithological information from (Shasherina et al., 2023), which included nine classes of grain size concentrations, from clay to coarse sand, by reference), and magnetic susceptibility (MS). Consequently, we derived a three-component model, each component of which represents a factor contributing to the sediment geochemical assemblages, which accounts for 73.0% of variable variances. Using the factoextra (Kassambara and Mundt, 2020) and missMDA (Josse and Husson, 2016) packages, all computations and statistical methods are implemented in R (R Core Team, 2024).

3. Results and discussion

Three main factors that significantly influence the distribution of lithological and geochemical features in Kasplya Lake during whole Holocene are the findings of the XRF inorganic geochemistry analysis and its subsequent PCA.

The majority of the model’s described variance (43.7 out of 73%) is described by the first one (PC1). Element loadings in PC1 that are highest include Fe, Co, Sr, Si, and Al. PC1 is associated with silt grain size classes. Generally, the elements mentioned are related to lithogenic material. For instance, the loadings of Ti and Al, which are regarded as “conservative,” are regulated by the addition of lithogenic matter (Bertrand et al., 2024). In the case of Lake Kasplya, this matter inflows with silt-sized grains. The most significant influence on the geochemical assemblage comes from these “lithogenic” processes that control the distribution of the most elements. Consequently, PC1 would be referred to as the “lithogenic” factor.

The second one is PC2, which describes 13.4% of the variable variance. Cu and Pb have the largest PC2 factor loadings among the variables; Si also has a high PC2 loading. Additionally, the largest PC2 loadings are found in medium silt, sandy grain classes, and MS. Higher MS values with Cu and Pb loadings typically indicate a higher level of pedogenic matter input (Bertrand et al., 2024). But rise of sediment MS also may mean a pyrite chemical process occurring in the lake’s body. As a result, PC2 indicates how much chemically altered matter enters the sediment (endo- or exogenic). It is necessary to investigate the causes of these inputs that significantly contribute to the lithogenic and elemental distribution features in the Kasplya core.

PC3, the final one, explains 12.0% of the variance in the variable. The highest PC3 factor loadings are found in the proportion of silt-sized grains and

the TOC concentration. Possibly, PC3 represents the organic matter accumulation on the lake or organic matter inflow from the basin. More research is needed to determine the boundaries between exo- and endogenic sources of organic matter.

4. Conclusions

The reconstruction of processes that control the distribution of organic and inorganic matter in lake systems is made possible by the application of XRF and organic geochemistry in palaeolimnological research. Three factors were identified for Kasplya Lake based on our interpretation of the lake geochemistry record: lithogenic, chemically altered matter input, and organic matter loadings. In order to precisely determine the geochemical and biological processes occurring within the lake, more research is necessary on the recorded data.

Acknowledgements

This study was supported by the Russian Science Foundation project №.23-77-10063.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Shasherina L.V., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. et al. 2023. Sedimentation history in lakes of Dnieper-Dvina interfluvium in the Lateglacial and Holocene (on example of lakes Kuprinskoe and Kasplya). In: Periglacial Vostochno-Evropetskoi ravniny. Materialy Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii, pp. 221. (In Russian)
- Bertrand S., Tjallingii R., Kylander M.E. et al. 2024. Inorganic Geochemistry of Lake Sediments: A Review of Analytical Techniques and Guidelines for Data Interpretation. *Earth-Science Reviews* 249: 104639. DOI: [10.1016/j.earscirev.2023.104639](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104639)
- Blaauw M., Christen J. A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6 (3): 457-474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)
- Josse J., Husson F. 2016. missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis. *Journal of Statistical Software* 1 (70): 1-31. DOI: [10.18637/jss.v070.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01)
- Kassambara A., Mundt F. 2020. factextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7.
- R Core Team. 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Weltje G.J., Bloemsmas M.R., Tjallingii R. et al. 2015. Prediction of geochemical composition from XRF core scanner data: a new multivariate approach including automatic selection of calibration samples and quantification of uncertainties. In: Croudace I.W., Rothwell R.G. (Ed.), *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a Non-destructive Tool for the Environmental Sciences*. Dordrecht, pp. 507–534.

Геохимическая летопись донных отложений озера Каспля (Смоленская область) и её интерпретация для голоцена

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYАндреев Р.А.^{1,2*}, Шашерина Л.В.², Константинов Е.А.², Манакова О.И.¹¹МГУ имени М.В. Ломоносова, мкр. Ленинские горы, 1, Москва, 119234, Россия²Институт географии РАН, Старомонетный пер. 29, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. Данная работа направлена на реконструкцию истории озера Каспля (Смоленская область) в голоцене на основе геохимической летописи. Для разреза был проведён элементный анализ рентгенфлуоресцентным методом, затем полученные значения вместе с литологическими данными для разреза использовались для метода главных компонент (МГК). На его основе получена трёхкомпонентная модель, описывающая 73% дисперсии. Каждая компонента отражает фактор, определяющий геохимические и литологические особенности озёрных отложений, накопившихся в течение голоцена: «литогенный», привнос в осадок, преобразованного хемогенными процессами и привнос в озеро органики.

Ключевые слова: палеолимнология, рентгенфлуоресцентный анализ (РФА), метод главных компонент (МГК), озёрные отложения

Для цитирования: Андреев Р.А., Шашерина Л.В., Константинов Е.А., Манакова О.И. Геохимическая летопись донных отложений озера Каспля (Смоленская область) и её интерпретация для голоцена // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 251-255. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-251](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-251)

1. Введение

Элементный анализ содержания неорганического и органического веществ в озёрных отложениях – важные источники палеолимнологических данных, позволяющий реконструировать историю осадконакопления в озёрах. Озеро Каспля расположено в краевой зоне валдайского (позднеплейстоценового) оледенения, на границе бассейнов Днепра и Западной Двины, в 35 км от г. Смоленска (Смоленско-Московская возвышенность). История развития бассейна данного озера, в частности его связи с бассейном Днепра в прошлом, остаются до конца неизученными. Геохимические данные, позволяющие реконструировать палеогидрологические условия озёрных бассейнов, смогут прояснить историю развития региона в целом. Цель данного исследования – реконструировать факторы, определяющие геохимический состав донных отложений озера Каспля.

2. Материалы и методы

Ключевой участок данного исследования – озеро Каспля с площадью зеркала и бассейна 3,45

и 585 км² соответственно. Максимальная глубина озера – 3,2 м, озеро проточное, из него берёт своё начало р. Каспля и впадает р. Клёц. Территория бассейна сложена песками и моренными валунными суглинками, слагающими соответственно водноледниковые и моренные холмистые равнины.

Колонка донных отложений озера (Kas-17) получена в ходе полевых работ в феврале 2022 года с помощью модифицированного бура Ливингстона. Точка отбора расположена в наиболее глубокой юго-западной части озера. Керны были разрезаны и проанализированы с разрешением 0,1 м в Лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН.

Разрез был датирован радиоуглеродным методом: 10 дат с помощью ускорительной масс-спектрометрии (глубже 9,5 м) и с помощью жидкостной сцинтилляции (6 дат, до 9,5 м). Датирование разреза Kas-17 проведено методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) выполнено в лаборатории ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН. Датирование сцинтилляционным методом, в свою очередь, выполнено в лаборатории геоморфологических и палеогеографических

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dorionio40@gmail.com (Р.А. Андреев)

Поступила: 08 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



исследований полярных регионов и Мирового океана Института Наук о земле СПбГУ. Возрастная модель накопления отложений с разрешением 0,1 м построена методом байесовского моделирования с использованием пакета для R rbacon (Blaauw and Christen, 2011).

Элементный анализ неорганического вещества (36 элементов) проведён на рентгенфлуоресцентном анализаторе Спектроскан МАКС-GVM с использованием стандартной методики для образцов почв (ГОСТ 33850-2016) Содержание органического вещества - общий органический углерод (ТОС), общий азот и фосфор - получены с помощью метода сухого сжигания на CHNS-анализаторе Vario Isotope Cube (Elementar) в ЦКП Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН.

Для статистического анализа результаты РФА были логарифмически преобразованы с помощью формулы, данной в Weltje et al., 2015. Затем был проведён анализ методом главных компонент (МГК) с масштабированием переменных. В качестве переменных для МГК (всего 36) использованы 22 преобразованных органогенных (ТОС и азот) и неорганических элементов, а также один геохимический коэффициент (C/N). Остальные переменные – дополнительные литологические данные по разрезу, включавшие в себя концентрацию 9 классов гранулометрического состава отложений и магнитную восприимчивость (Шашерина и др., 2023). Таким образом, получена трёхкомпонентная модель (объяснено 73,0% дисперсии), где каждая компонента описывает факторы, определяющие совместное распределение групп переменных. Все расчёты проведены в программной среде R (R Core Team, 2024), с использованием пакетов factextra (Kassambara and Mundt, 2020) и missMDA (Josse and Husson, 2016) для заполнения отсутствующих значений.

3. Результаты и обсуждение

Обобщенное строение опорной колонки Kas-17: 17,4 – 15 м – минерагенные слоистые илы с резкой верхней границей; 15-9,6 м – хемогенно-органогенные ритмиты, плавно сменяющиеся органо минеральным илом (9,6-7,3 м) и гиттией (7,3-0 м). По результатам рентгенфлуоресцентного анализа разреза Kas-17 и дальнейшей статистической обработки его данных, совмещённых с литологическими данными выявлено три ведущих фактора, действовавших на литологический и геохимический состав отложений в течение голоцена.

Наибольшая доля объяснённой дисперсии принадлежит первой главной компоненте (43,7 из 73,0%). Наибольшую факторную нагрузку имеют такие элементы, как Fe, Co, Sr, Si и Al. Первая компонента также связана с алевритистой фракцией минеральных частиц. В целом, перечисленные элементы связаны с поступлением обломочного вещества в озеро. Например, концентрации Al и Ti связываются с привносом такого вещества и

рассматриваются как «консервативные» элементы (Bertrand et al., 2024). В случае озера Каспия, данный материал поступает с алевритистыми частицами. Данный процесс имеет наибольшее влияние на элементный состав отложений озера. Таким образом, первая компонента описывает условный «литогенный» фактор развития озера.

Вторая компонента описывает 13,4% дисперсии. Cu и Pb имеют наибольшую факторную нагрузку среди элементов для второй компоненты, также высокое её значение имеет Si, часть которого имеет, очевидно, неорганическое происхождение. Вдобавок, наибольшую факторную нагрузку имеют магнитная восприимчивость и фракции песков и среднего алеврита. Повышенные значения магнитной восприимчивости и накопление Cu и Pb могут свидетельствовать об усилении интенсивности поступления почвенного вещества в озеро с водосбора (Bertrand et al., 2024). Также известно, что в озере могут происходить хемогенные процессы образования пирита, и его накопление может индцироваться повышением магнитной восприимчивости. Следовательно, вторая компонента может индцировать как данный процесс, так и хемогенные процессы в озере. Определение полных причин совместного накопления данных компонент озёрного осадка в течение голоцена требует дальнейшего исследования.

Последняя компонента, третья, объясняет 12,0% дисперсии. Высокие значения факторной нагрузки имеют ТОС и фракции мелкого алеврита. Вероятно, третья компонента отражает аккумуляцию органогенного вещества в озере, или его поступление с озёрного бассейна. Определение источников поступления будет рассмотрено в дальнейших исследованиях.

4. Выводы

Определение процессов, влияющих на распределение органического и неорганического вещества в озёрных системах возможно с применением РФА и методов анализа концентрации органического вещества в палеолимнологических исследованиях. Выявлено три фактора, определявших состав озёрных отложений озера Каспия на протяжении голоцена: «литогенный», привнос почвенного вещества или хемогенные процессы в озере, а также фактор поступления органического материала. В целях определения конкретных геохимических и биологических процессов на озере необходимы дальнейшие исследования.

Благодарности

Исследование поддержано Российским научным фондом, проект № 23-77-10063.

Конфликт интересов

Авторы заявляют отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

Шашерина Л.В., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. 2023. История осадконакопления в озёрах Днепровско-Двинского междуречья в позднеледниковье и голоцене (на примере оз. Купринское и Каспля). Перигляциал Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири. В: Материалы Всероссийской научной конференции, С. 221.

Bertrand S., Tjallingii R., Kylander M.E. et al. 2024. Inorganic Geochemistry of Lake Sediments: A Review of Analytical Techniques and Guidelines for Data Interpretation. *Earth-Science Reviews* 249: 104639. DOI: [10.1016/j.earscirev.2023.104639](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104639)

Blaauw M., Christen J. A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6 (3): 457-474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)

Josse J., Husson F. 2016. missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis.

Journal of Statistical Software 1 (70): 1-31. DOI: [10.18637/jss.v070.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01)

Kassambara A., Mundt F. 2020. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7.

R Core Team. 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Weltje G.J., Bloemsmas M.R., Tjallingii R. et al. 2015. Prediction of geochemical composition from XRF core scanner data: a new multivariate approach including automatic selection of calibration samples and quantification of uncertainties. In: Croudace I.W., Rothwell R.G. (Ed.), *Micro-XRF Studies of Sediment Cores: Applications of a Non-destructive Tool for the Environmental Sciences*. Dordrecht, pp. 507–534.

Paleoenvironmental reconstruction of climate by diatoms from sediments of three deep freshwater lakes of Evenkia (Siberia, Russia)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYBolobanshchikova G.N.^{1*}, Rogozin D.Y.^{1,2}¹Federal Research Center “Krasnoyarsk science Center” Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science” (IBP SB RAS) 660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/50²Siberian Federal University 660041, Krasnoyarsk, Svobodny str., 79

ABSTRACT. The study aimed to determine the species composition of diatoms in the bottom sediments of the freshwater lakes Zapovednoye, Cheko, and Peyungda, situated in the taiga zone of the southern region of Evenkia within the boundaries of the Tungusky State Nature Reserve. A total of 255 taxa have been identified in these lakes, with their ecological characteristics also established. The diatom community present in the bottom sediments of the aforementioned lakes showcases species that are common across all three lakes, as well as some that are exclusive to every single reservoir. An examination of the acquired data indicated the existence of overarching trends in the evolutionary trajectory of lakes Cheko, Zapovednoye, and Peyungda. Nevertheless, discernible discrepancies are observed in the species composition of diatoms within their bottom sediments, both in terms of quality and quantity, thereby delineating Lake Peyungda in a distinctive position in comparison to lakes Zapovednoye and Cheko. This disparity is likely attributed to the relatively shallow depth of Lake Peyungda, leading to an inclination towards a heightened level of eutrophication in its species composition, as opposed to the conditions observed in lakes Cheko and Zapovednoye.

Keywords: diatoms, freshwater lakes, bottom sediments, paleolimnology, paleoecology, climate reconstruction

For citation: Bolobanshchikova G.N., Rogozin D.Y. Paleoenvironmental reconstruction of climate by diatoms from sediments of three deep freshwater lakes of Evenkia (Siberia, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 256-261. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-256

1. Introduction

The study area encompasses three freshwater lakes, namely Lake Cheko, Lake Zapovednoe, and Lake Peyungda, situated in Eastern Siberia, Russia. Lake Cheko (60°57.904'N, 101°51.551'E) on the Central Tunguska Plateau, is positioned approximately 8 km from the inferred epicenter of the 1908 «Tunguska event». With an oval-shaped structure and a maximum depth of approximately 54 m, Lake Cheko is fed by the Kimchu River, a tributary of the Chunya River, ultimately flowing into the Podkamennaya Tunguska River. Lake Zapovednoe (60°31.688'N, 101°43.740'E) located in close proximity 60 km to Lake Cheko. It is characterized by a nearly circular shape with a diameter of around 500 m and a maximum depth of 60 m. Lake Peyungda (60°37.174'N 101°38.442'E) boasts almost regular round shape with a diameter of approximately 600 m and a maximum depth of 35 m. Both Lake Zapovednoe and Lake Peyungda are interlinked

by the small Verkhnyaya Lakura River, a tributary of the Podkamennaya Tunguska River (Rogozin et al., 2017; Rogozin et al., 2023).

2. Materials and Methods

The research approach involved the retrieval and analysis of sediment cores from each of the aforementioned lakes Cheko, Zapovednoe and Peyungda, in June 2016, July 2018, and September 2022, respectively. Upon extraction, the sediment cores were vertically transported to the laboratory for further investigation. Subsequently, the cores were meticulously disassembled and sectioned at specific intervals for analysis - 1 cm for Lake Cheko and Lake Zapovednoe, and 2 cm for Lake Peyungda. The sediment samples derived from each section underwent meticulous preparation and processing for diatom analysis utilizing established methodologies involving 30% H₂O₂ (Bolobanshchikova

*Corresponding author.

E-mail address: galina.ibp@mail.ru (G.N. Bolobanshchikova)

Received: June 23, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



et al., 2023). Permanent preparations were crafted using the highly refractive Naphrax resin, and subsequent enumeration of diatom valves was executed utilizing the parallel transect method (Bolobanshchikova et al., 2023). The construction of diagrams illustrating the qualitative and quantitative composition of diatoms within the sediment cores was facilitated using Past 2.15 software (Hammer et al., 2001). The taxonomic identification of diatoms was facilitated through the use of well-established keys (Bolobanshchikova et al., 2023) and systematic summaries to discern ecological and geographical attributes concerning habitat, salinity, water pH, geographical distribution, and rheophilicity (Barinova et al., 2006).

3. Results and Discussion

The results obtained from the analysis of Lake Cheko revealed a total of 131 taxa of diatoms below the genus level in the bottom sediments. The predominant diatom species in the sediments were valves of benthic cosmopolitan species, characteristically indifferent to salinity and flow velocity, with a preference for alkaline water conditions, constituting a majority proportion ranging from 51% to 65% of the total mass. Conversely, the presence of planktonic species was notably limited, often comprising less than 10% of the total count. In the case of Lake Zapovednoe, an examination of the bottom sediments unearthed 139 taxa of diatoms below the genus rank. The sediment composition predominantly featured benthic and planktonic-benthic cosmopolitan species, exhibiting indifference to salinity and flow rate, and a predilection for alkaline water conditions. Noteworthy was the increased prevalence of planktonic species in Lake Zapovednoe compared to Lake Cheko, constituting up to 26-28% at certain depths. A distinctive feature of the diatom flora in Lake Zapovednoe was the notable representation of valves from the genus *Tabellaria*, a presence considerably more pronounced than in Lake Cheko. Regarding Lake

Peyungda, a diverse array of approximately 255 taxa of diatoms below the genus rank was identified. The lake was predominantly characterized by cosmopolitan diatom species, displaying indifference towards salinity and favoring alkaline water conditions and water mass mobility. Notably, variations in the dominant species composition were observed across different time periods, with planktonic-benthic species, particularly *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing, and planktonic species such as *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen, occupying crucial ecological niches within the lake. Moreover, the abundance of benthic diatom species was observed to be consistently lower than that of planktonic and planktonic-benthic species throughout the core depth profiles, rarely exceeding 9% of the total count.

Cluster analysis facilitated the delineation of five primary zones (Distance) within the bottom sediments of three lakes, accompanying alterations in the species composition of diatoms (Fig. 1).

Zone DV (2480-485BCE) exhibits a reduction in the relative abundance of benthic and planktonic-benthic diatom species that thrive in warm, stagnant or flowing waters, while their representation among planktonic diatoms is on the rise. This phenomenon may be attributed to diminished mineral concentrations, potentially stemming from reduced meltwater runoff or precipitation levels. The decline in heat-loving species proportions may suggest a cooling trend in the climate. Consequently, conditions in this zone are presumed to be progressively *drier* and *colder*.

Zone IV (485BCE-763CE) is notable for a decrease in planktonic species compared to the preceding zone, coupled with an uptick in planktonic-benthic and benthic thermophilic species, halophiles, and species associated with standing or flowing waters. These findings hint at warming trends and heightened mineralization levels within the lake, likely influenced by external mineral influx from increased precipitation or melting permafrost. The prevailing climate in this era appears to have been *wetter* and *warmer*.

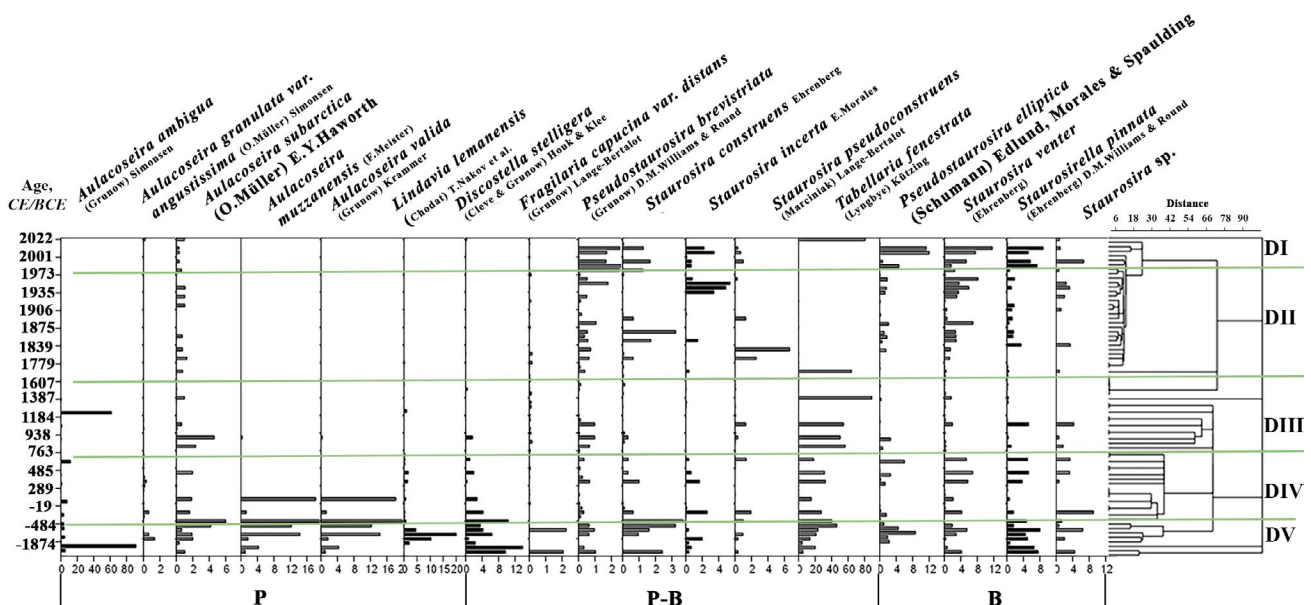


Fig.1. The distribution of diatoms in the bottom sediments of lakes Cheko, Zapovednoye, and Peyungda has been examined with designated DI-DV zones.

Within *Zone DIII (763-1687 CE)*, there is a discernible trend towards an escalation in species favoring mineral-rich aquatic environments, accompanied by a reduction in species preferring consistent water column mixing. These changes potentially signal reservoir eutrophication, possibly triggered by rising temperatures or diminishing precipitation levels. Consequently, mineral concentrations in the lake could be on the rise due to lowered water levels. Midway through this zone, there is an increase in cold-tolerant and water-mixing-preference species, indicating a phase of stagnation during a *warmer* and *drier* climate period.

Zone DII (1687-1973 CE) is characterized by a gradual surge in planktonic-benthic and benthic thermophilic species, coupled with a decline in planktonic species, including those that favor *colder* conditions. This pattern suggests a further *warming* of the climate, albeit with increased humidity, relative to the preceding zone.

Notably, *Zone DI (1973-2022 CE)* displays an elevation in benthic and planktonic-benthic species, while the prevalence of planktonic species is minimal. Collectively, these trends indicate a burgeoning eutrophication trend in aquatic ecosystems, possibly coinciding with another spell of *warm* and *dry* climatic conditions.

4. Conclusions

The recurring fluctuations in diatom species composition within the bottom sediments of lakes Cheko, Zapovednoe, and Peyungda bear witness to historical climate variations. The established climate change sequence can tentatively be delineated as “cold-dry” → “wet-warm” → “warm-dry” → “wet-warm” → “warm-dry”.

Acknowledgments

This study received support from the Russian Science Foundation as part of grant 22-17-00185, accessible at <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185>.

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interest.

References

- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy [Diversity of Algal Indicators in Environmental Assessment]. Tel-Aviv: Pilies Studio Press. (in Russian)
- Bolobanshchikova G.N., Palagushkina O.V., Rogozin D.Y. 2023. Diatom Complexes in Modern Bottom Sediments of Lakes of the Central Tunguska Plateau, Evenkia. *Contemporary Problems of Ecology* 16 (2): 103–117. DOI: [10.1134/S199542552302004X](https://doi.org/10.1134/S199542552302004X)
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 1-9.
- Rogozin D.Y., Darin A.V., Kalugin I.A. et al. 2017. Sedimentation rate in Cheko Lake (Evenkia, Siberia): New evidence on the problem of the 1908 Tunguska Event. *Reporters of AS. Earth Sciences* 476(2): 1226-1228. DOI: [10.1134/S1028334X17100269](https://doi.org/10.1134/S1028334X17100269)
- Rogozin D.Y., Krylov P.C., Dautov A.N. et al. 2023. Morphology of Lakes of the Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk Krai, Evenkiya): New Data on the Problem of the Tunguska Event of 1908. *Reporters of RAS. Earth Sciences* 510(1): 307-311. DOI: [10.1134/S1028334X23600044](https://doi.org/10.1134/S1028334X23600044)

Палеоэкологическая реконструкция климата по диатомовым водорослям из донных отложений трех глубоких пресноводных озер Эвенкии (Сибирь, Россия)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYБолобанщикова Г.Н.^{1*}, Рогозин Д.Ю.^{1,2}¹Обособленное подразделение Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН «Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук» (ИБФ СО РАН) улица Академгородок, д. 50/50, Красноярск, 660036, Россия²Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

АННОТАЦИЯ. Определён видовой состав диатомовых водорослей донных отложений в пресноводных озерах Заповедное, Чеко и Пеюнга, расположенных в таежной зоне юга Эвенкии на территории государственного заповедника «Тунгусский». На данный момент в этих озёрах выявлено порядка 255 таксонов и определены их экологические характеристики. В диатомовом сообществе донных отложений этих водоёмов присутствуют виды, встречающиеся как во всех трёх озёрах, так и те, которые встречаются только в одном из них. Анализ полученных данных показал наличие общих тенденций в развитии озёр Чеко, Заповедное и Пеюнга. Однако, видовой состав диатомовых водорослей в их донных отложениях имеет ряд отличий, как в качественном, так и в количественном соотношении, и ставит в обособленное положение по отношению к озёрам Заповедное и Чеко озеро Пеюнга. Вероятнее всего это может быть связано с тем, что в отличии от озёр Чеко и Заповедное, озеро Пеюнга имеет меньшую глубину, поэтому его видовой состав показывает тенденцию к большему уровню эвтрофицированности, нежели в озёрах Чеко и Заповедное.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, пресноводные озёра, донные отложения, палеолимнология, палеоэкология, реконструкция климата

Для цитирования: Болобанщикова Г.Н., Рогозин Д.Ю. Палеоэкологическая реконструкция климата по диатомовым водорослям из донных отложений трех глубоких пресноводных озер Эвенкии (Сибирь, Россия) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 256-261. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-256

1. Введение

Озеро Чеко (60°57.904' СШ, 101°51.551' ВД) расположено на Центрально-Тунгусском плато (Восточная Сибирь, Россия) в южной части Эвенкийского муниципального района Красноярского края в непосредственной близости (8 км) от предполагаемого эпицентра Тунгусского взрыва 1908 года. Максимальная глубина озера около 54 м, является проточным водоемом овальной формы диаметром около 400 м. Через озеро протекает река Кимчу, приток реки Чуня, впадающей в р. Подкаменная Тунгуска. Озеро Заповедное (60°31.688' СШ, 101°43.740' ВД) - небольшой водоем почти круглой формы диаметром около 500 м, расположенный на границе Государственного природного заповедника «Тунгусский» (Эвенкийский район Красноярского края), в 60 км от поселка

Ванавара, и приблизительно в 60 км к югу от озера Чеко и предполагаемого эпицентра взрыва 1908 г. Максимальная глубина озера около 60 м. Озеро Пеюнга (60°37.174' СШ 101°38.442' ВД) также имеет почти правильную округлую форму диаметром около 600 м, и расположено в 12 км к северо-западу от оз. Заповедное. Максимальная глубина озера приблизительно 35 м. Через оба озера протекает небольшая река Верхняя Лакура, приток реки Подкаменная Тунгуска (Рогозин и др., 2017; Рогозин и др., 2023).

2. Материалы и методы.

Керн донных отложений оз. Чеко был отобран в июне 2016 года, оз. Заповедное - в июле 2018 г., оз. Пеюнга - в сентябре 2022 г. После транспор-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: galina.ibp@mail.ru (Г.Н. Болобанщикова)

Поступила: 23 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



тировки в лабораторию в вертикальном положении керны были разобраны и разрезаны на слайсы – для Чеко и Заповедное с шагом в 1 см, для Пеюнгды в 2 см. Образцы донных отложений, отобранные из каждого слайса, проходили пробоподготовку и техническую обработку на диатомовый анализ по отработанной методике с использованием 30% H₂O₂ (Болобанщикова и др., 2023). Постоянные препараты готовились с применением высокопреломляющей смолы Naphrax. Подсчёт створок диатомовых проводился методом параллельных трансект (Болобанщикова и др., 2023). Для построения диаграмм качественного и количественного состава диатомовых в донных отложениях, а также для кластерного анализа использовали Past 2.15 (Hammer et al., 2001). Для определения видовой принадлежности диатомовых использовали устоявшийся набор определителей и систематических сводок (Болобанщикова и др., 2023). Эколого-географическая характеристика давалась по отношению к местообитанию, солёности, pH воды, по географическому распространению и реофильности (Барина и др., 2006).

3. Результаты и обсуждение

Озеро Чеко. Всего в донных отложениях озера Чеко обнаружен 131 таксон диатомовых водорослей рангом ниже рода. В донных осадках преобладают створки бентосных космополитных видов, индифферентных по отношению к солёности и скорости течения, предпочитающие щелочную реакцию воды, доля которых достигает периодами от 51 до 65% от общей массы. Доля планктонных видов незначительна – зачастую менее 10%.

Озеро Заповедное. В донных отложениях озера Заповедное обнаружено 139 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода. Основную долю составляют бентосные (до 45%) и планктонно-бентосные (до 35%) космополитные виды, индифферентных по отношению к солёности и скорости течения, предпочитающие щелочную реакцию воды. В отличие от озера Чеко, в оз. Заповедном планктонные виды занимали более существенную

роль – до 26-28% на некоторых глубинах, а особенностью диатомовой флоры донных отложений озера является хорошая представленность створок видов из рода *Tabellaria*, в то время как в озере Чеко их встречаемость гораздо ниже.

Озеро Пеюнгда. На данный момент в озере Пеюнгда обнаружено порядка 255 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода. В водоёме преобладают космополитные виды, индифферентные по отношению к солёности, предпочитающие щелочную реакцию воды и подвижность водных масс. В процентном соотношении в различные периоды доминирующую роль занимают планктонно-бентосные виды, в основном за счёт *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing – от 46 до 88,8% на различных глубинах, а также планктонные виды за счёт *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen - от 62 до 92%. Количество бентосных видов на протяжении всего керна было существенно ниже планктонных и планктонно-бентосных видов, редко выходя за границу 9%. Наибольшее количество створок бентосных видов зафиксировано в толще керна – 28,5%.

Кластерный анализ позволил разделить донные отложения трёх озёр на 5 основных зон (**Distance**) с изменением в видовом составе диатомовых водорослей (Рис. 1).

Зона DV (2480-485BCE) характеризуется уменьшением доли бентосных и планктонно-бентосных, теплолюбивых видов стояче-текучих вод, но увеличивается их доля среди планктонных диатомовых. Вероятно, это могло быть вызвано уменьшением концентрации минеральных веществ, посредством уменьшения стока талых вод или выпавших осадков). Уменьшение доли теплолюбивых видов может говорить о похолодании климата. Таким образом, в этой зоне предположительно климат становится более сухим и холодным.

Зона IV (485BCE-763CE) характеризуется уменьшением по сравнению с предыдущей зоной долей планктонных видов, при этом увеличивается доля планктонно-бентосных и бентосных теплолюбивых видов, галофилов и видов стояче-текучих вод, что может говорить нам о потеплении и об увеличении уровня минерализации в озере, вероятно

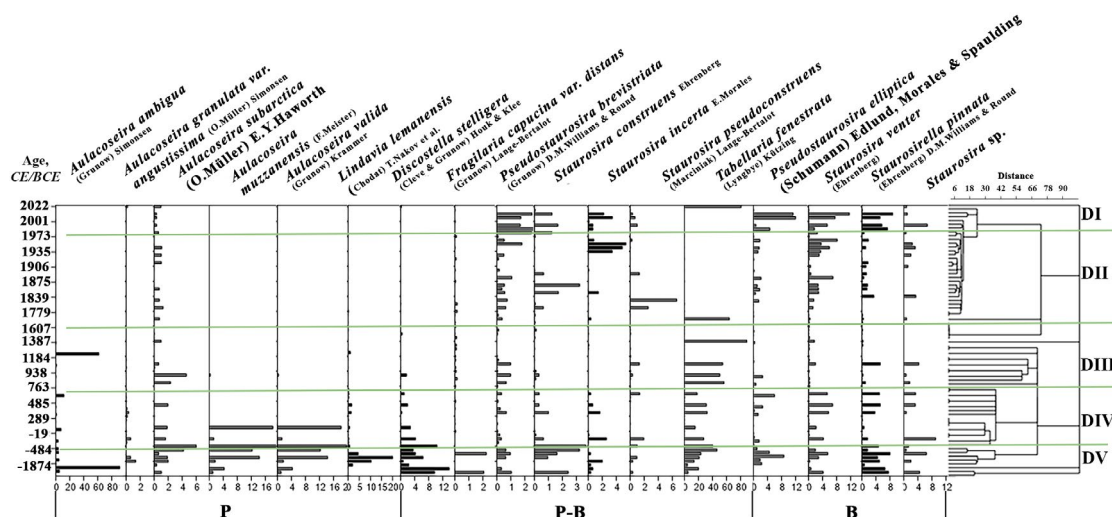


Рис.1. Распределение диатомовых водорослей в донных отложениях озёр Чеко, Заповедное и Пеюнгда (DI-DV обозначены зоны).

за счёт притока минеральных веществ извне из-за увеличения уровня осадков, либо таяния льдов вечной мерзлоты. Предположительно климат стал более влажным и теплым.

ЗонаDIII (763-1687CE) характеризуется тенденцией к увеличению видов, для которых предпочтительнее более минерализованная водная среда и уменьшение видов, предпочитающих постоянное перемешивание водной толщи, что может говорить об эвтрофикации водоёма, возможно за счёт повышения температурного режима или же уменьшения уровня осадков, которые могли привести к увеличению концентрации минеральных веществ в озере вследствие снижения его уровня. С середины зоны увеличивается доля холодолюбивых и предпочитающих перемешивание водной толщи видов. Предположительно происходит стагнация на некоторый период тёплого и более сухого климата.

ЗонаDII (1687-1973CE) характеризуется постепенным увеличением доли планктонно-бентосных и бентосных теплолюбивых видов, а также уменьшением доли планктонных, в т.ч. холодолюбивых видов. Предположительно климат становится ещё более теплым, но в то же время более влажным по сравнению с предыдущей зоной.

ЗонаDI (1973-2022CE) характеризуется возрастанием бентосных и планктонно-бентосных видов. Доля планктонных видов минимальна. В целом наблюдается тенденция к эвтрофикации водоёмов. Вероятно, происходит очередная стагнация тёплого и сухого климата.

4. Выводы

Неоднократные изменения в видовом составе диатомовых водорослей в донных отложениях озёр Чеко, Заповедное и Пеюнга говорят об изменениях климата, происходивших в про-

шлом. Предположительно модель изменения климата можно записать как «холодно-сухо»→«влажно-тепло» →«тепло-сухо»→ «влажно-тепло» → «тепло-сухо».

Благодарности

Исследование выполнено за счёт гранта РФФ 22-17-00185, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185>.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 1-9.

Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio Press.

Болобанщикова Г.Н., Палагушкина О.В., Рогозин Д.Ю. 2023. Видовой состав диатомовых водорослей в современных донных отложениях озер Центрально-Тунгусского плато, Эвенкия. *Сибирский экологический журнал* 30(2): 119-135. DOI: [10.15372/SEJ20230202](https://doi.org/10.15372/SEJ20230202)

Рогозин Д.Ю., Дарьин А.В., Калугин И.А. и др. 2017. Оценка скорости накопления донных отложений в озере Чеко (Эвенкия, Сибирь): новые сведения по проблеме Тунгусского феномена 1908 года. *Докл. АН. Науки о Земле* 476 (6): 685-687. DOI: [10.7868/S0869565217300181](https://doi.org/10.7868/S0869565217300181)

Рогозин Д. Ю., Крылов П. С., Даутов А. Н. и др. 2023. Морфология озер Центрально-Тунгусского плато (Красноярский Край, Эвенкия): новые сведения по проблеме Тунгусской катастрофы 1908 года. *Доклады РАН. Науки о Земле* 510(1): 81-85. DOI: [10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)

Spatial and temporal features of lacustrine sedimentogenesis on the southeastern periphery of the Fennoscandian crystal shield: paleolimnological studies of the Lososinsky reservoir



Belkina N.A.^{1,2*}, Potakhin M.S.^{1,2}, Ludikova A.V.³, Syarki M.T.¹, Bogdanova M.S.¹, Gatalskaya E.V.¹, Orlov A.V.^{1,2}, Subetto D.A.²

¹ Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 50 Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, 185030, Russia

² Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Emb. Moika, St. Petersburg, 191186, Russia

³ Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 9 Sevastyanova str, St. Petersburg, 196105, Russia

ABSTRACT. Paleolimnological studies of the Lososinskiy Reservoir (Karelia) have made it possible to reconstruct the history of its development from the Ice Lake to the artificial waterbasin. Five stages of sedimentogenesis were identified. It was based on lithostratigraphy, diatom and geochemical analysis of bottom sediments. The detailing of the anthropogenic period of the Lososinskiy Reservoir was carried out on the study of the landscape structure of the catchment area using the mass-balance production model of the ecosystem.

Keywords: Fennoscandian crystal shield, lake sediments, sedimentogenesis, biostratigraphy, diatom analysis, chemical composition, anthropogenic impact

For citation: Belkina N.A., Potakhin M.S., Ludikova A.V., Syarki M.T., Bogdanova M.S., Gatalskaya E.V., Orlov A.V., Subetto D.A. Spatial and temporal features of lacustrine sedimentogenesis on the southeastern periphery of the Fennoscandian crystal shield: paleolimnological studies of the Lososinsky reservoir // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 262-267. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-262

1. Introduction

The Lososinskiy Reservoir is one of the oldest reservoirs in the Karelia Republic. It is located on the Olonets Upland, in the area of the development of glacial and water-glacial land forms. The Reservoir was created at the beginning of the XVIII century for the needs of the Petrovsky Iron Factory. The Lososinskiy Reservoir formed on the site of two small lakes. The rise in the waterlevel of the Reservoir was about 3.5 m, and the water area almost doubled (Potakhin et al., 2023). The waters of the Lososinskiy Reservoir are characterized as medium-alkaline slightly acidic neutral bicarbonate class of the calcium and magnesium groups. According to the phosphorus content, the reservoir has a mesotrophic status. According to the content of organic matter, it corresponds to the mesohumic type of waters (Lakes..., 2013).

*Corresponding author.

E-mail address: bel110863@mail.ru (N.A. Belkina)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

The purpose of the scientific research is to study the features of the formation of lake bottom sediments of the Lososinskiy Reservoir at different stages of its history from the Ice Lake to the present day status.

2. Materials and methods

The Lososinskiy Reservoir is located in the drainage area of the Lososinka River (a tributary of Lake Onego). The catchment area of Lososinskiy Reservoir is 101 km². The altitude above sea level is 183 m. The area of the Reservoir is 8.1 km², the length of the coast line is 22.1 km, the volume of water is 46.2 million m³, the average depth is 5.7 m, the largest is 8.5m. Comprehensive expeditionary research was carried out in 2021-2023 and included of (1) studying the landscapes of the catchment area, (2) sampling of water to study chemical and biological characteristics, (3) sam-

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



pling of surface sediment samples (with a LIMNOS sediment corer) and sampling long sediment cores (with a Russian Corer) for lithological, chemical and diatom analysis. The study of the material composition of water and sediments was carried out in accordance with the methods of analysis generally accepted in world practice (Belkina et al., 2023).

3. Results and discussion

Lithostratigraphy study of retrieved sediment cores of the of the Lososinskiy Reservoir confirms the existence of a local Ice Lake that arose in the marginal zone of the Luga stage of the Valday Glaciation, the age of which is estimated at 15.7 cal. BP/ 13.2¹⁴C BP (Velichko et al., 2017). The uppermost unit of the bottom sediments (thickness up to 5m) is everywhere represented by brown organic silty-clay gyttja. Below lies the next unit represented by olive silty-clay organic gyttia (thickness up to 2.2 m), which is underlain by sandy silt layer and gray clay with layers of medium-grained sand (laminated clays – varved clays). The lithology of the bottom sediment sand the previously obtained GIS reconstructions of the Onego Ice Lake (OIL) (Subetto et al., 2022) all owed us to conclude that as a result of the breakthrough and descent of the Ice Lake through the moraine ridge in the direction of OIL (modern Lososinka River), two small lakes were formed in the depressions of inter-marine depressions (Potakhin et al., 2023). In 1705, a dam was created at the site of the breakthrough of the moraine ridge, and in 1774, an adjustable dam. The water level was raised, the water flow was regulated, a reservoir was formed on the basis of the two lakes, which inherited the basin of the glacial reservoir. In this status, the Reservoir has been functioning for more than 300 years and currently represents a formed the reservoir-lake with an established water regime.

The diatom study of bottom sediments revealed the main stages of the evolution of the lake's ecosystem including its reservoir stage. The earliest stage is characterized with high abundances of meso-eutrophic species and low diatom concentrations. The latter resulted from high sediment supply to the basin caused by enhanced erosion intensity in the catchment. At the next stage, significantly increased concentrations of diatom valves and chrysophyte cysts and diatom species diversity indicate a rise in productivity of the lake ecosystem. The following stage is characterized with a notable decrease in the proportions of the most eutrophic species. With the transition to the reservoir stage, the most dramatic changes in the lake ecosystem occur. Rapidly increased abundances of benthic diatoms indicate an increase of the shallow-water areas as the coastal lowlands were flooded due to the rise in the water level. Modern diatom assemblages composition suggests increasing eutrophication as a result of increasing anthropogenic pressure

The use of the mass-balance model of V.V. Boulion (2020) for the reconstruction of the ecosystem of a small lake that existed before the creation of the reservoir also showed that an increase in the level of the

reservoir, an increase in the volume of water mass and the area of the littoral affects the ratio of trophic links: the role of coastal and bottom communities increases due to a decrease in planktonic species. The model experiment confirmed that an increase in the external phosphorus load on the reservoir after an active anthropogenic transformation of the catchment area led to an increase in ecosystem productivity. According to calculations, at the present stage of ecosystem development, about 36% of the organic matter of the total primary production participates in the formation of bottom sediments with an intensity of about 20-23 gC·m⁻²·year⁻¹, which is 49-55% of the total intake of organic matter per year (40-45 gC·m⁻²·year⁻¹, according to observations the composition of suspended solids from sedimentation traps). Which is significantly higher than for a small lake before anthropogenic transformations (16 gC·m⁻²·year⁻¹ with a total ecosystem productivity of 32 gC·m⁻²·year⁻¹). The contribution of the elements of the trophic network of the reservoir to the organic matter of bottom sediments also changes with an increase in the level of the reservoir and an increase in anthropogenic load.

A study of the catchment area of the reservoir was carried out to identify geochemical markers of changes in the sedimentary process in bottom sediments as a result of anthropogenic impact. Five periods of transformation of its landscape structure were identified: (1) before the beginning of the XVIII century - the period of natural landscapes of the middle taiga zone; (2) after the creation of the reservoir from the beginning of the XVIII century to the 30s of the XX century – the period of initial transformation of landscapes; (3) from 1930 to 1970 – the period of forest cover change as a result of continuous logging; (4) from 1970 to 2000. – the period of maximum transformation of landscapes (forest reclamation and drainage of swamps, military construction, suburban development and land cultivation, logging, development of sand and gravel pits, construction of roads and power lines); (5) from 2000 to the present – a period of relative stabilization of landscapes. Analysis of changes in anthropogenic load on the reservoir showed that logging (period 3) significantly affected the hydrological regime of the reservoir: the volume of runoff increased, and as a result, the amount of matter entering it from the catchment increased. The change in the material composition of sedimentary matter, mainly its organic part, was significantly influenced by forest reclamation, which manifested itself in an increase in concentrations of Fe, Mn, humic and fulvic acids in bottom sediments. Anthropogenic eutrophication of the reservoir naturally manifests itself in an increase in the content of phosphorus and organic matter in precipitation.

4. Conclusion

The study of the features of the formation of lake bottom sediments of the Lososinskiy Reservoir at different stages of its history has shown that the creation of reservoirs in conditions of highly dissected relief and excess moisture, forming abundant surface runoff, can

be compared with climatic changes in its effect on the ecosystem of the reservoir.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of RSF grant # 24-17-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Boulion V.V. 2020. A system for assessing and forecasting the bioproductivity of lacustrine-type ecosystems. *Water Resources* 47(3): 459-467. DOI: [10.31857/S0321059620030037](https://doi.org/10.31857/S0321059620030037)

Velichko A.A., Faustova M.A., Pisareva V.V. et al. 2017. History of the Scandinavian ice sheet and surrounding landscapes in the Valday ice age and the Early Holocene. *Led i Sneg [Ice and Snow]* 57(3): 391-416. DOI: [10.15356/2076-6734-2017-3-391-416](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-391-416) (in Russian)

Lakes of Karelia. Reference book. 2013. In: Filatov N.N., Kukharev V.I. (Ed.). Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. (in Russian)

Subetto D.A., Belkina N.A., Strakhovenko V.D. et al. 2022. Paleolimnology of lake Onego: from the OnegoIce lake to the present state. Petrozavodsk: KarRC RAS. (in Russian)

Potakhin M.S., Belkina N.A., Ryabinkin A.V. et al. 2023. Study of depression and bottom sediments of Lososinskoye reservoir. In: LXXVI Gertsenovskiy readings. Geography: development of science and education I, pp. 350-353.

Belkina N.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. et al. 2023. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate. *Water* 15: 1014. DOI: [10.3390/w15061014](https://doi.org/10.3390/w15061014)

Пространственно-временные особенности озерного осадконакопления на юго-восточной периферии Фенноскандинавского кристаллического щита: палеолимнологические исследования Лососинского водохранилища

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Белкина Н.А.^{1,2*}, Потахин М.С.^{1,2}, Лудикова А.В.^{3,1}, Сярки М.Т.¹,
Богданова М.С.¹, Гатальская Е.В.¹, Орлов А.В.^{1,2}, Субетто Д.А.²

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, пр. Александра Невского, 50, г. Петрозаводск, 185030, Россия

² Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Набережная р. Мойки, 48, г. Санкт-Петербург, 191186, Россия

³ Институт озероведения Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук, ул. Севастьянова, 9, г. Санкт-Петербург, 196105, Россия

АННОТАЦИЯ. Палеолимнологические исследования Лососинского водохранилища позволили реконструировать историю его развития от приледникового водоема до наших дней. На основе литостратиграфического, диатомового и геохимического анализа донных отложений выделено 5 этапов пресноводного седиментогенеза. Детализация антропогенного периода выполнена на основе изучения ландшафтной структуры водосборного бассейна с применением масс-балансовой продукционной модели экосистемы.

Ключевые слова: Фенноскандинавский кристаллический щит, озерные отложения, седиментогенез, литостратиграфия, диатомовый анализ, химический состав, антропогенное воздействие

Для цитирования: Белкина Н.А., Потахин М.С., Лудикова А.В., Сярки М.Т., Богданова М.С., Гатальская Е.В., Орлов А.В., Субетто Д.А. Пространственно-временные особенности озерного осадконакопления на юго-восточной периферии Фенноскандинавского кристаллического щита: палеолимнологические исследования Лососинского водохранилища // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 262-267. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-262

1. Введение

Лососинское водохранилище является одним из старейших водохранилищ Карелии. Оно расположено в пределах Олонецкой возвышенности, в районе развития ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа. Водоем был создан в начале XVIII века для нужд Петровского чугунолитейного завода на месте двух малых озер. Подъем уровня воды составил около 3,5 м, площадь зеркала увеличилась почти в два раза (Потахин и др., 2023). Воды Лососинского водохранилища характеризуются как среднещелочностные слабокислые нейтральные гидрокарбонатного класса группы кальция, магния. По содержанию фосфора водоем имеет мезотрофный статус. По содержанию органического вещества

– соответствует мезогумусному типу вод (Озера..., 2013).

Целью исследования является изучение особенностей формирования озерных донных отложений Лососинского водохранилища на разных этапах его истории от приледникового водоема до наших дней.

2. Материалы и методы

Лососинское водохранилище расположено на водосборе р. Лососинка (приток Онежского озера). Площадь водосбора – 101 км². Высота над уровнем моря – 183 м БС. Площадь водоема – 8,1 км², длина береговой линии – 22,1 км, объем воды –

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bel110863@mail.ru (Н.А. Белкина)

Поступила: 10 июня 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



46,2 млн м³, средняя глубина 5,7 м, наибольшая – 8,5 м. В течение 2021-2023 гг. были проведены комплексные экспедиционные исследования водохранилища и его водосборного бассейна, которые включали: изучение ландшафтов водосбора, отбор проб воды для исследования химических и биологических характеристик, отбор поверхностных проб донных отложений (стратометром Limnos) и отбор длинных колонок донных отложений (торфяным буром) на литологический, химический и диатомовый анализ. Изучение вещественного состава воды и донных отложений проводили в соответствии с общепринятыми в мировой практике методами анализа (Belkina et al., 2023).

3. Результаты и обсуждение

Литостратиграфическое изучение кернов донных отложений Лососинского водохранилища подтверждает существование в позднеледниковье в этом районе локального приледникового водоема, возникшего в краевой зоне лужской стадии валдайского оледенения, возраст которой оценивается в 15,7 кал. тыс. л.н. / 13,2 ¹⁴C тыс. л.н. (Величко и др., 2017). Верхняя толща донных отложений (мощность до 5 м) повсеместно представлена коричневым органогенным илом, ниже которого залегает оливковый ил (мощность до 2,2 м), который подстилается опесчаненным илом и серым глинистым алевритом с прослоями среднезернистого песка (ленточные глины). С учетом выполненных ранее ГИС реконструкций (Субетто и др., 2022) был сделан вывод о том, что в результате прорыва и спуска приледникового озера через моренную гряду в направлении Онежского озера (современная р. Лососинка) в углублениях межморенных понижений образовались два небольших озера (Потяхин и др., 2023). В 1705 г. на месте прорыва моренной гряды была создана дамба, а в 1774 г. – регулируемая плотина. Уровень воды был повышен, сток зарегулирован и на месте расположения озер образовалось водохранилище, которое унаследовало котловину приледникового водоема. В этом статусе водоем функционирует уже более 300 лет и в настоящее время представляет собой сформировавшееся озеро-водохранилище со сложившимся водным режимом.

Изучение состава диатомовых комплексов фитопланктона в донных отложениях позволило выделить основные этапы развития экосистемы озера, включая этап функционирования водохранилища. Для первого этапа характерна высокая численность мезо-эвтрофных видов и низкие концентрации створок диатомей. Последнее обусловлено поступлением в донные отложения минеральных частиц вследствие активных эрозионных процессов на водосборе. На втором этапе происходит повышение продуктивности озерной экосистемы, что нашло отражение в значительном увеличении концентраций створок диатомовых и цист золотистых водорослей и в увеличении видового разнообразия диатомей. На третьем этапе в составе диатомовых

комплексов существенно сократилась численность наиболее высокотрофных видов. Резкая трансформация экосистемы водоема происходит на этапе создания водохранилища: значительно увеличивается доля бентосных диатомей, что свидетельствует о расширении мелководной зоны. Состав диатомовых комплексов современных осадков указывает на усиление процесса эвтрофирования водоема, связанного с ростом антропогенной нагрузки.

Применение масс-балансовой модели В.В. Бульона (2020) для реконструкции экосистемы малого озера, существовавшего до создания водохранилища, показало, что повышение уровня воды в водоеме, увеличение объема водной массы и площади литоральной зоны влияет на соотношение трофических звеньев: возрастает роль прибрежных и придонных сообществ за счет уменьшения планктонных видов. Модельным экспериментом подтверждено то, что увеличение внешней фосфорной нагрузки на водохранилище после активной антропогенной трансформации водосбора привело к увеличению продуктивности экосистемы. Согласно расчетам, на современном этапе развития экосистемы около 36% органического вещества общей первичной продукции участвует в формировании донных отложений с интенсивностью около 20-23 гС·м⁻²·год⁻¹, что составляет 49-55% от общего поступления органического вещества за год (40-45 гС·м⁻²·год⁻¹, по наблюдениям состава взвесей из седиментационных ловушек). Что значительно выше, чем для малого озера до антропогенных преобразований (16 гС·м⁻²·год⁻¹ при общей продуктивности экосистемы 32 гС·м⁻²·год⁻¹). Изменяется и вклад элементов трофической сети водоема в органическое вещество донных осадков при повышении уровня водоема и росте антропогенной нагрузки.

Для выявления в донных отложениях геохимических маркеров изменения осадочного процесса в результате антропогенного воздействия было проведено изучение водосборной территории водохранилища. Было выделено 5 периодов преобразования его ландшафтной структуры: (1) до начала XVIII века - период естественных ландшафтов среднетаежной зоны; (2) после создания водохранилища с начала XVIII века до 30-х годов XX века – период начальной трансформации ландшафтов; (3) с 1930 по 1970 гг. – период изменения лесного покрова в результате сплошных рубок леса; (4) с 1970 по 2000 гг. – период максимальной трансформации ландшафтов (лесная мелиорация и осушение болот, военное строительство, дачное освоение и окультуривание земель, рубка леса, разработка песчано-гравийных карьеров, строительство дорог и ЛЭП); (5) с 2000 г. по настоящее время – период относительной стабилизации ландшафтов. Анализ изменений антропогенной нагрузки на водохранилище показал, что рубка леса (3 период) значительно повлияла на гидрологический режим водоема: увеличился объем стока, и как следствие, возросло количество вещества, поступающего в него с водосбора. На изменение вещественного состава осадочного вещества, главным образом его

органической части, значительно повлияла лесная мелиорация, что проявилось в увеличении концентраций Fe, Mn, гуминовых и фульвовых кислот в донных отложениях. Антропогенное эвтрофирование водоема закономерно проявляется в росте содержания фосфора и органического вещества в осадках.

4. Заключение

Изучение особенностей формирования озерных донных отложений Лососинского водохранилища на разных этапах его истории показало, что создание водохранилищ в условиях сильно расчлененного рельефа и избытка влаги, формирующих обильный поверхностный сток, по своему влиянию на экосистему водоема может быть сравнимо с климатическими изменениями.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Бульон В.В. 2020. Система оценки и прогнозирования биопродуктивности экосистем озерного типа. *Водные ресурсы* 47(3): 302-311. DOI: [10.31857/S0321059620030037](https://doi.org/10.31857/S0321059620030037)

Величко А.А., Фаустова М.А., Писарева В.В. и др. 2017. История Скандинавского ледникового покрова и окружающих ландшафтов в валдайскую ледниковую эпоху в начале голоцена. *Лед и снег* 57(3): 391-416.

Озера Карелии. Справочник. 2013. В: Филатов Н.Н., Кухарев В.И. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д. и др. 2022. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Потахин М.С., Белкина Н.А., Рябинкин А.В. и др. 2023. Изучение особенностей строения котловины и донных отложений Лососинского водохранилища. В: *Материалы Международной научно-практической конференции LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования I*, С. 350-353.

Belkina N.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. et al. 2023. Contemporary Sedimentation in Lake Onego: Geochemical Features of Water, Suspended Matter, and Accumulation Rate. *Water* 15: 1014. DOI: [10.3390/w15061014](https://doi.org/10.3390/w15061014)

Middle Pleistocene history of vegetation in the Lotus Lake basin in the extreme south of the Russian Far East

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Belyanin P.S.*, Belyanina N.I.

The Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Radio Str., 7, Vladivostok, 690041, Russia

ABSTRACT. The evolution of vegetation in the Lotus Lake basin in the Middle Pleistocene has been studied. Six phases of paleovegetation evolution based on palynological data have been identified. It has been established that in warm epochs correlating with MIS 11, 9 and 7 in the Lotus Lake Basin were dominated by broad-leaved and coniferous forests with a diverse species composition. Under cooling in MIS 10, the distribution of coniferous-small-leaved forests with the participation of shrubby birch increased. In MIS 8 and 6, the main type of vegetation was represented by coniferous-small-leaved forests with the dominance of pine, birch, spruce and the participation of elm and oak.

Keywords: Tumen River, Paleolake, lacustrine sediments, vegetation changes, spore-pollen analysis

For citation: Belyanin P.S., Belyanina N.I.† Middle Pleistocene history of vegetation in the Lotus Lake basin in the extreme south of the Russian Far East // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 268-273. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-268

1. Introduction

Features of the evolution of the natural environment of the Middle Pleistocene are one of the most interesting and little-studied pages in Quaternary history. The most complete records of the evolution of paleovegetation are reflected in the pollen spectra of lake sediments, which have a very limited distribution in the south of the Russian Far East. Their thickest sediments are present in sections of the Khanka Depression and in shelf of Peter the Great Bay. Significant thicknesses of lacustrine sediments were also revealed by drilling while studying the geological structure of Quaternary sediments in the mouth of the Tumannaya River. This made it possible to reconstruct the evolution of vegetation in the south of the Russian Far East in the Middle Pleistocene (MIS 11-6).

2. Materials and methods

2.1. Study area

Modern Lake Lotus is a small freshwater lake in the extreme south of the Russian Far East. It is located at the mouth of the Tumannaya River (at 42°25' N; 130°39' E) at the distance of 9 km to the west of the coast of Peter the Great Bay (the Sea of Japan). The water surface area of Lake Lotus is about 12.3 km², its depth does not exceed 2.0 m, and the water surface of the lake is located at a height of about 2 m above the

sea level. The lake is surrounded from the north, the west, and the east by the low hills with swampy small valleys. In the south, the lake is framed by a low riverbed swell, up to 2 m high, behind which an accumulative plain of the Tumannaya River, is located.

The Lake Lotus Basin is located in the contact zone with the Manchurian and North China floristic provinces (Komarov, 1908). Its swampy shores are covered with reed grass, forbs, sedge meadows and grass mires. The water surface of the lake is partially covered with thickets of *Nelumbo komarovii*. Sparse broadleaf forests of *Quercus dentata* and *Quercus mongolica*, with minor contributions of *Fraxinus rhynchophylla*, *Tilia amurensis* and *Tilia taquetii*, and also thickets with dominated by *Lespedeza*, *Corylus* and *Rhododendron* dominate the slopes of the lake basin (Chubar, 2000).

2.2. Drilling and sampling

Borehole 26, 86.6 m deep, was drilled by a drilling rig on the western shore of Lotus Lake. The samples of the sediments were taken from the borehole at the intervals of 5–10 cm. Sampling and the lithological description of drill cores were carried out by B.I. Pavlyutkin (Far Eastern Geological Institute FEB RAS), and a palynological analysis was carried out by L.P. Karaulova (Primorgeology) and N.I. Belyanina (Pacific Geographical Institute of FEB RAS).

*Corresponding author.

E-mail address: pavelbels@yandex.ru (P.S. Belyanin)

Received: May 15, 2024; Accepted: July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2.3. Palynological analysis

Fossil pollen particles were extracted from the sediments using standard methods, which included treatment with 10% KOH, separation of minerals with a solution of KJ and CdJ₂ (2.2 g/cm³), after which the samples mounted in glycerol jelly (Pokrovskaya, 1950). Pollen and spores in glycerol jelly were identified, photographed and counted using an optical microscope Axio Scope.A1 and camera AxioCam ICc1 (Carl Zeiss). Proportion of each pollen taxon was calculated in percent of the pollen sum arboreal taxa, dwarf shrubs and herbs. Proportion of plant groups (trees and shrubs – AP, herbs, grass, and dwarf shrubs – NAP, spores – SP) was calculated in percent of the total amount of microfossils. At least 250 pollen grains of arboreal, dwarf shrubs, and herb were counted in each sample. Identifications of pollen grains were made with the aid of pollen atlases (Nakamura, 1980).

3. Results and discussion

3.1. The lithology features of sediments

A significant amount of drilling work made it possible to establish that under the layer of the Upper Pleistocene-Holocene estuarine sediments a stratum of greenish-gray thin-layered fine-sandy-silty rocks was exposed. The layering character is clearly seasonal: microlayers consist of two elements – fine sandy and silty. The micro rhythm thickness does not exceed 1–2 mm. At the base they are underlain by weakly rounded pebbles, crushed stones and porphyries, cemented by sandy loam. They are overlapped by the layers of the Late Pleistocene sediments of alluvial-marine genesis and the Holocene sediments – sands, sandy loams, and loams.

3.2. Pollen analysis

Pollen data indicate that the main elements of vegetation in the Lotus Lake Basin in MIS 11, 9 and 7 were diverse broad-leaved and coniferous forests. Among coniferous plants, representatives of the subgenera *Haploxylon* and *Diploxylon*, and also the genus *Picea*, predominated. Representatives of the North China and Manchurian floristic provinces, such as *Castanea*, *Celtis*, *Magnolia*, *Tsuga*, *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Juglans*, *Phellodendron*, *Carpinus*, and also Cupressaceae, were present among the broad-leaved trees. Currently, the ranges of many of them cover the warm-temperate and subtropical regions of the Korean Peninsula (Lee, 1980), as well as the islands of Honshu, Kyushu and Shikoku (Ohwi, 1965). It is worth noting that the genus *Carpinus* south of 40° N in Korea and northeast China includes 7 species (Chang and Jeon, 2018), the genus *Quercus* has 11 species (Chang, 2007), and the genus *Pinus* has 6 species (Farjon, 2010). In the south of the Russian Far East, only *Quercus mongolica*, *Quercus dentata*, *Pinus koraiensis* and *Pinus densiflora* are found (Chubar, 2001).

Similar global climatic fluctuations, which caused the restructuring of vegetation in the Middle

Pleistocene, are also noted for more northern regions of Russia. Thus, in Chukotka, in MIS 11, 9 and 7, there were repeated changes of herbaceous-birch shrub tundra with herbaceous or herbaceous-alder-birch tundra (Lozhkin et al., 2007). At the same time, in the lower reaches of the Irtysh, the average annual temperature was 8–10 ° higher than the current one, and the northern border of broad-leaved and needle-leaved forests and the steppe shifted to the north by 1 000–1 300 km (Volkova, 2008).

Coniferous-small-leaved forests with a predominance of *Betula* sect. *Nanae*, *Betula* sp., *Duschekia*, *Picea*, *Pinus* subgen. *Haploxylon* and *Pinus* subgen. *Diploxylon*, *Ulmus* and *Quercus* were widespread in the Lake Basin Lotus under the colder climatic conditions during the MIS 10. *Duschekia*, *Picea* and *Pinus* subgen. *Haploxylon* were the main components of the slopes vegetation during the MIS 8. *Sphagnum* mires with *Betula* sect. *Nanae* were dominated in the coastal plains of the Sea of Japan. Under a later cooling, comparable to MIS 6, fir-pine-birch forests with the participation of *Quercus* and *Ulmus* spread. Vegetation similar in composition is reflected in the palynospectrum from the modern soil, which we studied at the foot of the Baitoushan volcano (42° 03' N; 128° 03' E), at an altitude of about 600 m. This indicates significant spatial migrations of plants during climatic fluctuations in the Middle Pleistocene in the south of the Far East.

4. Conclusions

The paleobotanical data obtained allowed us to reconstruct vegetation development in the Lotus Lake Basin during the Middle Pleistocene (MIS 11–6). It has been found out that in the warm epochs, correlated with MIS 11, 9, and 7, diverse broad-leaved and needle-leaved forests dominated in the Lotus Lake Basin. During periods of cooling, the Lake Lotus Basin were widespread by coniferous/small-leaved forests with the participation of shrub species of birch and alder (MIS 10) and coniferous/small-leaved forests consisted of pine, birch, and spruce with the participation of elm and oak (MIS 8 and 6).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Chang C.S. 2007. *Fagaceae*. In: Park C.W. (Ed.), The genera of vascular plants of Korea. Seoul, South Korea: Academy Publishing Co, pp. 268–274.
- Chang C.S., Jeon J.I. 2018. *Betulaceae*. In The Genera of Vascular Plants of Korea (Korean ver.). Seoul: Flora of Korea Editorial Committee (ed.), Hongrung Publishing Co, pp. 364–376.
- Chubar E.A. 2000. Specific of Nature in Lower Reaches of the Tumannaya River and Adjacent Sea Water Area. In: Kas'yanov V.L. et al. (Eds.), The state of environment and biota of the southwestern part of Peter the Great Bay and the Tumannaya River Mouth. Vol. 2. Vladivostok, pp. 15–41. (in Russian)

Farjon A. 2010. *A Handbook of the World's Conifers* (two vols.). The Netherlands: Brill Leiden, Academic Publishers.

Komarov V.L. 1908. Introduction to the floras of China and Mongolia. In: *Works of the Imperial St. Petersburg Botanical Garden XXIX(1) Tipo-Litografiya*. Gerol'd, Saint-Petersburg, pp. 1–176. (in Russian)

Lee T.B. 1980. *Illustrated flora of Korea*. Seoul: Hyangmunsa.

Lozhkin A.V., Anderson P.M., Matrosova T.V. et al. 2007. A continuous record of environmental change in Chukotka during the last 350 thousand years. *Tikhookeanskaya Geologiya* 26(6): 53–59. DOI: [10.1134/S1819714007060048](https://doi.org/10.1134/S1819714007060048) (in Russian)

Nakamura J. 1980. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part I. *Special Publications from the Osaka Museum of Natural History, Osaka, Japan* 13: 1–91.

Ohwi J. 1965. *Flora of Japan*. Washington: Switsonian Institute.

Pokrovskaya I.M. 1950. *Pollen analysis*. Moscow: Gosgeolizdat. (in Russian)

Volkova V.S. 2008. Landscapes and climate of Interglacial and Interstage epochs of the Pleistocene of western Siberia. In: Prishchepa O.M., Subetto D.A., Dzyuba O.F. (Eds.), *Palynology: Stratigraphy and Geoecology*. Saint-Petersburg, pp. 88–91. (in Russian)

История растительности бассейна озера Лотос на крайнем юге Дальнего Востока России в среднем плейстоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Белянин П.С.* , Белянина Н.И.

Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Радио, 7, Владивосток, 690041, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучена эволюция растительности в бассейне озера Лотос в среднем плейстоцене. По палинологическим данным выделено шесть фаз эволюции палеорастительности. Установлено, что в теплые эпохи, коррелирующие с МИС 11, 9 и 7, в бассейне оз. Лотос преобладали широколиственные и хвойные леса с разнообразным видовым составом. При похолодании в МИС 10 увеличивалось распространение хвойно-мелколиственных лесов с участием кустарниковой березки. В МИС 8 и 6 основной облик растительности представляли хвойно-мелколиственные леса с доминированием сосен, берез, ели и участием вяза и дуба.

Ключевые слова: река Туманная, палеозеро, озерные отложения, смены растительности, спорово-пыльцевой анализ

Для цитирования: Белянин П.С., Белянина Н.И.† История растительности бассейна озера Лотос на крайнем юге Дальнего Востока России в среднем плейстоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 268-273. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-268

1. Введение

Особенности развития природной среды среднего звена плейстоцена являются одними из самых интересных и малоизученных страниц в четвертичной истории. Наиболее полные летописи эволюции палеорастительности отражены в пыльцевых спектрах озерных отложений, имеющих весьма ограниченное распространение на юге Дальнего Востока России. Наибольшие по мощности их осадки присутствуют в разрезах Приханкайской впадины и в отложениях шельфа залива Петра Великого. В ходе изучения геологического строения четвертичных отложений в приустьевой части р. Туманной, бурением были вскрыты значительные по мощности толщи озерных осадков, что позволило реконструировать эволюцию растительности на юге Дальнего Востока России в среднем плейстоцене (МИС 11-6).

2. Материалы и методы

2.1. Объект исследования

Современное озеро Лотос – небольшое пресноводное озеро, расположенное на крайнем юге Дальнего Востока России, в устье реки Туманной (42°25' с. ш., 130°39' в. д.), в 9 км к западу от залива

Петра Великого (Японское море). Площадь водной поверхности озера составляет около 12.3 км², а его глубина не превышает 2.0 м. Водная поверхность озера лежит на высоте около 2 м над уровнем моря. С севера, запада и востока озеро окружено невысокими холмами с заболоченными небольшими долинами. С юга оно обрамлено валом высотой около 2 м, за которым начинается аккумулятивная равнина реки Туманной.

Бассейн оз. Лотос расположен в зоне контакта Маньчжурской и Северо-Китайской флористических провинций (Комаров, 1908). Его заболоченные берега покрывают вейниково-разнотравные, осоковые луга и травяные болота. Водная поверхность частично покрыта зарослями *Nelumbo komarovii*. На склонах водосборного бассейна преобладают редкостойные широколиственные леса из *Quercus dentata* и *Quercus mongolica*, с участием *Fraxinus rhynchophylla*, *Tilia amurensis* и *Tilia taquetii* и кустарниковых зарослей из *Lespedeza*, *Corylus* и *Rhododendron* (Чубарь, 2000).

2.2. Бурение и отбор проб

Скважина 26 глубиной 86.6 м была пробурена на западном побережье оз. Лотос. Образцы отло-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: pavelbels@yandex.ru (П.С. Белянин)

Поступила: 15 мая 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



жений отбирались с интервалом 5-10 см. Отбор проб и литологическое описание кернов выполнены Б.И. Павлюткиным (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН), а палинологический анализ – Л.П. Карауловой (Приморгеология) и Н.И. Беляниной (Тихоокеанский институт географии ДВО РАН).

2.3. Палинологический анализ

Образцы из разрезов отбирались с интервалом 5–10 см. Спорово-пыльцевой анализ проведен по стандартной методике, включающей обработку 10% КОН, отделение минералов раствором KJ и CdJ₂ (2,2 г/см³), после чего образцы помещали в глицериновое желе (Покровская, 1950). Пыльцу и споры идентифицировали и подсчитывали с помощью оптического микроскопа Axio Scope A1 при увеличении × 400. Доля каждого таксона пыльцы рассчитывалась в процентах от суммы пыльцы деревьев, кустарников, трав и кустарничков. Доли групп растений (деревья и кустарники – AP, травы, злаки и карликовые кустарники – NAP, споры – SP) рассчитывали в процентах от общего количества микрофоссилий. В каждой пробе подсчитывали не менее 250 пыльцевых зерен древесных и кустарниковых растений. Идентификацию пыльцевых зерен проводили с помощью пыльцевых атласов (Покровская, 1950; Nakamura, 1980).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Литологические особенности отложений

Бурение показало, что под слоем верхнеплейстоцен-голоценовых эстуарных отложений обнажается пачка зеленовато-серых тонкослоистых мелкопесчано-алевритовых пород. Характер слоистости носит ярко выраженный сезонный характер: микрослои состоят из двух элементов – мелкопесчаного и алевритового. Мощность микрослоев не превышает 1–2 мм. В основании они подстилаются слабоокатанной галькой, щебнем и порфиритами, сцементированными супесью. Их перекрывают слои позднеплейстоценовых отложений аллювиально-морского генезиса и голоценовых отложений – песков, супесей и суглинков.

3.2. Результаты палинологического анализа

Палинологические данные свидетельствуют, что основными элементами растительности в бассейне оз. Лотос в МИС 11, 9 и 7 были разнообразные по составу широколиственные и хвойные леса. Среди хвойных деревьев преобладали представители подродов *Haploxyton* и *Diploxyton*, а также рода *Picea*. Среди широколиственных пород присутствовали растения Северо-Китайской и Маньчжурской флористических провинций, такие, как представи-

тели родов *Castanea*, *Celtis*, *Magnolia*, *Tsuga*, *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Juglans*, *Phellodendron*, *Carpinus*, а также Cupressaceae. В настоящее время, ареалы многих из которых охватывают теплоумеренные и субтропические области Корейского п-ова (Lee, 1980), а также о-вов Хонсю, Кюсю и Сикоку (Ohwi, 1965). Стоит отметить, что сейчас южнее 40 °с. ш. в Корее и на северо-востоке Китая род *Carpinus* насчитывает 7 видов (Chang and Jeon, 2018), рода *Quercus* 11 видов (Chang, 2007), а род *Pinus* – 6 видов (Farjon, 2010). Из них на юге Дальнего Востока встречается только *Quercus mongolica*, *Quercus dentata*, *Pinus koraiensis* и *Pinus densiflora* (Чубарь, 2000).

Значительные климатические колебания, вызвавшие перестройку растительности в среднем плейстоцене, отмечены и для более северных регионов Дальнего Востока. Так, на Чукотке в МИС 11, 9 и 7 происходили неоднократные смены травянисто-березовых кустарниковых тундр травянистыми или травянисто-ольхово-березовыми тундрами (Ложкин и др., 2007). В это же время в Западной Сибири, в низовьях Иртыша среднегодовая температура была на 8–10 ° выше современной, а северная граница широколиственных и игольчатых лесов и степей сместилась к северу на 1000–1300 км (Волкова, 2008).

В более холодном климате в МИС 10 широкое распространение в бассейне оз. Лотос получали хвойно-мелколиственные леса с преобладанием *Betula* sect. *Nanae*, *Betula* sp., *Duschekia*, *Picea*, *Pinus* subgen. *Haploxyton* и *Pinus* subgen. *Diploxyton*, *Ulmus* и *Quercus*. В МИС 8, основными компонентами растительности склонов были *Duschekia*, *Picea* и *Pinus* subgen. *Haploxyton* растительности. На прибрежных равнинах Японского моря преобладали сфагновые болота с *Betula* sect. *Nanae*. В МИС 6, в растительности доминировали пихтово-сосново-березовые леса с участием *Quercus* и *Ulmus*. Сходная по составу растительность выделена из субфоссильного палиноспектра, отобранного на абсолютной высоте 600 м у подножия вулкана Байтоушань в бассейне р. Туманной (42 °03' с. ш., 128 °03' в. д.). Это указывает на значительные пространственные миграции растений при климатических колебаниях в среднем плейстоцене на юге Дальнего Востока.

4. Заключение

Полученные палеоботанические данные позволили реконструировать развитие растительности в бассейне озера Лотос в среднем плейстоцене (МИС 11-6). В теплые эпохи, коррелирующие с МИС 11, 9 и 7, в бассейне озера Лотос преобладали разнообразные широколиственные и хвойнолиственные леса. В периоды похолоданий в бассейне озера Лотос преобладали хвойно-мелколиственные леса с участием кустарниковых пород березы и ольхи (МИС 10), а хвойно-мелколиственные леса состояли из сосны, березы и ели с участием из вяза и дуба (МИС 8 и 6).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Волкова В.С. 2008. Ландшафты и климат межледниковой и межстадиальной эпох плейстоцена Западной Сибири. В: Прищепа О.М., Субетто Д.А., Дзюба О.Ф. (Ред.), Палинология: Стратиграфия и геоэкология. Санкт-Петербург, с. 88–91.

Комаров В.Л. 1908. Введение в флору Китая и Монголии. Труды Императорского Санкт-Петербургского ботанического сада XXIX(1) Типолитография Герольд, Санкт-Петербург: 1–176.

Ложкин А.В., Андерсон П.М., Магросова Т.В. и др. 2007. Непрерывная запись изменений окружающей среды на Чукотке за последние 350 тыс. лет. Тихоокеанская геология 26(6): 53–59. DOI: [10.1134/S1819714007060048](https://doi.org/10.1134/S1819714007060048)

Покровская И.М. 1950. Пыльцевой анализ. Москва: Госгеолгиздат.

Чубарь Е.А. 2000. Природные особенности района р. Туманной в нижнем течении и сопредельной территории. В: Касьянов В.Л. и др. (Ред.), Состояние окружающей среды и биоты юго-западной части залива Петра Великого и устья реки Туманной. Том 2. Владивосток, с. 15–41

Chang C.S. 2007. *Fagaceae*. In: Park C.W. (Ed.), The genera of vascular plants of Korea. Seoul, South Korea: Academy Publishing Co, P. 268–274.

Chang C.S., Jeon J.I. 2018. *Betulaceae*. In The Genera of Vascular Plants of Korea (Korean ver.). Seoul: Flora of Korea Editorial Committee (ed.), Hongrung Publishing Co, P. 364–376.

Farjon A. 2010. A Handbook of the World's Conifers (two vols.). The Netherlands: Brill Leiden, Academic Publishers.

Lee T.B. 1980. Illustrated flora of Korea. Seoul: Hyangmunsa.

Nakamura J. 1980. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part I. Special Publications from the Osaka Museum of Natural History, Osaka, Japan 13: 1–91.

Ohwi J. 1965. Flora of Japan. Washington: Switsonian Institute.

Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Bolsunovsky A.Ya.*, Vakhrushev V.I., Dementyev D.V.

Institute of Biophysics FRC KSC Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50-50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

ABSTRACT. Large-scale research of the Yenisei River sediments that has been conducted in the area affected by the MCC of Rosatom over a long distance, up to 1580 km downstream of Krasnoyarsk, has revealed the presence of various artificial radionuclides, thus making it possible to calculate sedimentation rates by using different radioisotope techniques. Retrospective analysis shows that in the past 60 years, considerable activities of the artificial radionuclides ^{137}Cs and ^{152}Eu entered the sediments of the river from the MCC-affected area during the anomalous floods in 1966 and 1988 and ^{60}Co – during the 2006 flood. To explain the radionuclide peaks in the layers dated to other periods, additional sediment research is needed.

Keywords: sediments, the Yenisei River, artificial radionuclides, sedimentation rate, chronology

For citation: Bolsunovsky A.Ya., Vakhrushev V.I., Dementyev D.V. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 274-279. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-274

1. Introduction

Radioecological monitoring shows that sediments of the Yenisei River are contaminated by artificial radionuclides from the Mining-and-Chemical Combine (MCC) of Rosatom and global fallouts. Analytical studies of sediments from the near (15 km) and far (up to 1500 km) zones affected by the MCC detected a wide range of artificial radionuclides and radioactive particles (Bolsunovsky, 2010; Bolsunovsky et al., 2017). The analysis of the vertical distribution of radionuclides in the layers of sediment cores collected in the MCC-affected areas revealed peaks of ^{137}Cs and other radionuclides, which could be formed during the heavy floods in the Yenisei River (Sukhorukov et al., 2004; Bolsunovsky, 2010; Vakhrushev et al., 2023). During the floods, the large water discharge through sluices of the Krasnoyarsk Power Plant resulted in flooding of the river plain and riverside villages, including the MCC riverside zone. As the river flow rate increased during the flood, radioactive sediments were transferred from the floodplain zone at the MCC downstream, over considerable distances (Bolsunovsky et al., 2021; Vakhrushev et al., 2023). However, the dating of sediment layers is a necessary procedure to determine more accurately the periods when peaks of artificial radionuclides

were formed in sediments. The purpose of the present study was to analyze the spatial distribution of artificial radionuclides in the Yenisei River sediments and to reconstruct the chronology of deposition of radionuclides in the sediments using radioisotope techniques.

2. Materials and methods

Sediment cores used in the study were collected from the Yenisei River floodplain in the MCC-affected area, stretching as far as 1580 km downstream of Krasnoyarsk (close to the Arctic Circle). Sediment cores collected at the village of Balchug (15 km downstream of the MCC discharge point – about 97 km downstream of Krasnoyarsk) represent sediments of the near MCC-affected zone. Sediment cores collected at the villages of Zakharovka, Novonazimovo, Komsa, and Kureika (272 to 1580 km downstream of Krasnoyarsk) represent sediments of the far MCC-affected zone. The cores were collected using steel corers – 11-cm diameter pipes of different lengths, with flap valves. Sediment cores were cut into 2-4-cm layers at the sampling site. In laboratory, the dried sediment samples were analyzed for the artificial radionuclides ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , and ^{154}Eu and the natural radionuclides ^{210}Pb and ^{214}Pb using a GX2320 Canberra γ -spectrometer (U.S.) with

*Corresponding author.

E-mail address: radecology@gmail.com (A.Ya. Bolsunovsky)

Received: May 30, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



a hyper-pure germanium detector. Sedimentation rates were determined using the ^{210}Pb method, the ratios of artificial radionuclides, and the method of reference radionuclides.

3. Results and discussion

Analysis of sediment cores revealed 2 to 3 maxima of artificial radionuclides along the cores from the near MCC-affected zone (the village of Balchug) and 4 to 5 peaks of artificial radionuclides in the cores from the far MCC-affected zone (the villages of Zakharovka, Novonazimovo, and Komsa). The length of the cores collected in the far MCC-affected zone reached 140 cm. Some of the cores contained layers with abnormally high activity concentrations of the artificial radionuclide ^{137}Cs (up to 25000 Bq/kg), which corresponded to the low-activity radioactive wastes. Those layers were formed during the extreme flooding in 1966, which transported large masses of sediments from the MCC area to the town of Yeniseisk (410 km downstream of Krasnoyarsk) and, probably, farther downstream. Sediment layers with anomalous maxima of ^{137}Cs , under certain conditions, can serve as reference markers for the date of the 1966 flood (Bolsunovsky et al., 2021).

The upper layers of the sediment cores collected after the 2006 flood contained increased activity concentrations of ^{60}Co , which was also present in the form of radioactive microparticles. Those microparticles were detected in both the near and far MCC-affected zones (the village of Komsa), as far as 945 km downstream of Krasnoyarsk. The increased ^{60}Co activity concentrations in the upper sediment layers resulting from the 2006 flood can serve as the marker of the date (2006) for calculating sedimentation rates. Hence, for many of the sediment cores collected from the Yenisei River downstream of the MCC discharge point, there are two reference radionuclides marking flood dates: ^{60}Co in the upper part of the core (the 2006 flood) and, under certain conditions, ^{137}Cs in the lower part of the core (the 1966 flood).

Analysis of the sediment cores collected close to the MCC (the village of Balchug) showed that sedimentation rates calculated using the radionuclide ratio ($^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ and $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$) method ranged between 0.5 and 1.3 cm/year. That range was close to the range

of sedimentation rates obtained for the reference section of the river (upstream of the MCC) using the ^{210}Pb method (0.5–1.0 cm/year) (Vakhrushev et al., 2023). For the areas far away from the MCC, sedimentation rates calculated using the radionuclide ratio method ranged between 2.0 and 3.5 cm/year, and they were higher than the sedimentation rates obtained for the near zone, at the village of Balchug. The higher sedimentation rates in the areas located farther from the MCC may be caused by changes in hydrological conditions downstream of the confluences of large tributaries (the Kan River, the Angara River, and other rivers). The sedimentation rates in the far section of the river calculated using the method of reference radionuclides ^{137}Cs (the 1966 flood) and ^{60}Co (the 2006 flood) were generally similar to the rates obtained using the $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratio method.

The calculated sedimentation rates can be used to reconstruct the chronology of deposition of ^{137}Cs and other radionuclides in the Yenisei sediments. As an example, Figure 1 shows chronology of deposition of artificial radionuclides in the sediments at the village of Zakharovka, 272 km downstream of Krasnoyarsk. For that core, similar sedimentation rates were obtained by using the $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ ratio (2.3 cm/year) and the reference radionuclide ^{60}Co (2.2 cm/year). The maximal activity concentrations of ^{137}Cs in that core were formed in the layers of 1976-77, 1982-84, 1988-91, and 1994-1997 (Fig. 1A). One of the ^{137}Cs peaks (1988-91) was evidently associated with the heavy flood in the Yenisei in 1988. The ^{60}Co maxima in the sediment layers of that region were formed in 1995-98, 2006, and 2010. One of the ^{60}Co peaks (2006) was definitely associated with the major flood in 2006. The main maxima of ^{152}Eu (Fig. 1B) in sediment layers of that region were formed in 1976-77, 1982-84, 1990, and 1994-1998, completely coinciding with the dates of formation of ^{137}Cs peaks (Fig. 1A). Analysis demonstrated that one of the ^{137}Cs and ^{152}Eu peaks in that region was associated with the 1988 flood while one of the ^{60}Co peaks – with the 2006 flood. However, the ^{137}Cs and ^{152}Eu maxima in the sediment layers dated to 1976-77, 1982-84, and 1994-1997 and the ^{60}Co maxima in the layers dated to 1995-98 and 2010 cannot be attributed to the effects of the major floods. These maxima may be associated with unrecorded discharges from the MCC and changes

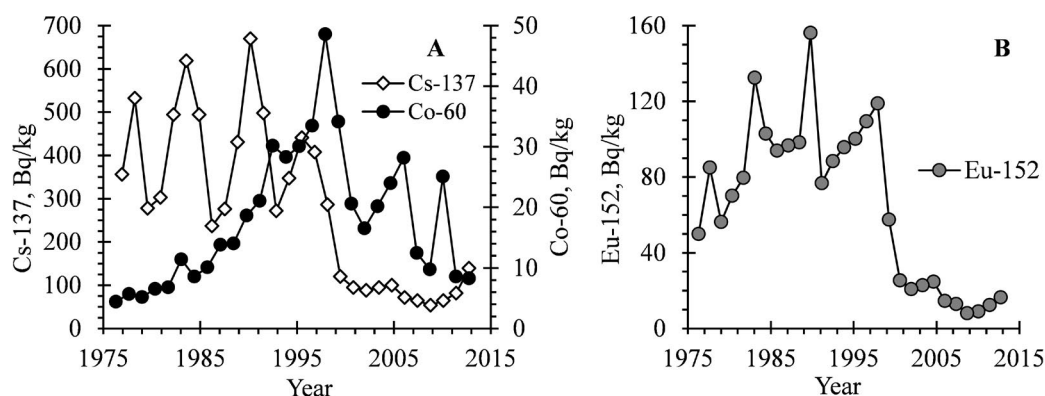


Fig.1. Chronology of deposition of the artificial radionuclides ^{137}Cs and ^{60}Co (A) and ^{152}Eu (B) in sediments of the Yenisei River in the region far downstream of the MCC, at the village of Zakharovka.

in the hydrological conditions in this remote section of the river. Some of the lower layers of sediment cores contained microparticles with ^{137}Cs and the transuranium element ^{241}Am , which can be used in the future studies to understand the occurrences of the maxima of artificial radionuclides in sediments.

4. Conclusions

Sediment cores collected from the Yenisei River close to the MCC (15 km) contained 2 to 3 peaks of artificial radionuclides along the core; the cores collected in the far MCC-affected zone (up to 1500 km downstream), which were up to 140 cm long, contained 4 to 5 maxima of radionuclides. The sedimentation rates calculated for the regions far away from the MCC (2.0 to 3.5 cm/year) were higher than the rates obtained for the near MCC-affected zone (0.5–1.3 cm/year). The reconstructed chronology of deposition of artificial radionuclides in the Yenisei River sediments demonstrated that in the past 60 years, considerable activities of the artificial radionuclides ^{137}Cs and ^{152}Eu entered the sediments of the river from the MCC-affected area during the anomalous floods in 1966 and 1988 and ^{60}Co – during the 2006 flood. More sediment cores need to be collected and studied to explain the occurrences of the radionuclide peaks in the layers dated to 1976-77, 1982-84, and 1994-1997.

Acknowledgements

The study was partly supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-27-20003) and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bolsunovsky A.Ya. 2010. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chemistry and Ecology* 26: 401–409.
- Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A. et al. 2017. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain. *Scientific Reports* 7(11132): 1–10.
- Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. 2021. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences* 498: 514–518.
- Sukhorukov F.V., Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M. et al. 2004. Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley. Novosibirsk: Publ. House of SB RAS “Geo”. (in Russian).
- Vakhrushev V.I., Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V. 2023. The use of radioisotope techniques to date Cs deposition in bottom sediments of the Yenisei River. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle* [Bulletin of Udmurt University. Biology Series. Earth Sciences] 33(2): 178-190. (in Russian)

Ретроспективный анализ поступления техногенных радионуклидов в донные отложения р. Енисей

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Болсуновский А.Я.* , Вахрушев В.И., Дементьев Д.В.

Институт биофизики ФИЦ КНЦ Сибирского отделения РАН, Академгородок, 50-50, Красноярск, 660036, Россия

АННОТАЦИЯ. Масштабные исследования донных отложений (ДО) реки Енисей в зоне влияния деятельности ГХК Росатома на протяженном участке до 1580 км по течению реки от г.Красноярска выявили широкий перечень техногенных радионуклидов, позволяющих использовать разные радиоизотопные методы расчета скоростей осадконакопления. Ретроспективный анализ показал, что за последние 60 лет значительная часть техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{152}Eu поступала в ДО реки из зоны ГХК во время аномальных паводков 1966 и 1988 годов, ^{60}Co – во время паводка 2006 года. Существование максимумов радионуклидов в слоях, датированных другими периодами времени, требует дополнительных исследований ДО.

Ключевые слова: донные отложения, река Енисей, техногенные радионуклиды, скорость осадконакопления, хронология

Для цитирования: Болсуновский А.Я., Вахрушев В.И., Дементьев Д.В. Ретроспективный анализ поступления техногенных радионуклидов в донные отложения р. Енисей // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 274-279. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-274

1. Введение

Донные отложения (ДО) реки Енисей по данным радиоэкологического мониторинга загрязнены техногенными радионуклидами в результате деятельности Горно-химического комбината (ГХК) Росатома и глобальных выпадений. Аналитические исследования проб ДО ближней (15 км) и дальней зоны (до 1500 км) влияния ГХК зарегистрировали широкий перечень техногенных радионуклидов, а также радиоактивные частицы (Bolsunovsky, 2010; Bolsunovsky et al, 2017). Проведенный анализ вертикального распределения радионуклидов в слоях кернов ДО, отобранных в зоне влияния ГХК, выявил максимумы ^{137}Cs и других радионуклидов, которые могли быть сформированы в периоды крупных паводков на р. Енисей (Сухоруков и др., 2004; Bolsunovsky, 2010; Вахрушев и др., 2023). Во время паводков большой расход воды через плотину Красноярской ГЭС приводил к затоплению поймы реки с прибрежными населёнными пунктами, включая береговую зону размещения ГХК. Возросшая во время паводка скорость течения реки привела к переносу радиоактивных донных отложений поймы реки из зоны вблизи ГХК на значительные расстояния по течению реки (Bolsunovsky

et al., 2021; Вахрушев и др., 2023). Однако для более точного установления временных периодов образования максимумом техногенных радионуклидов в ДО необходимо провести датировку слоев ДО. Цель настоящей работы – анализ пространственного распределения техногенных радионуклидов в ДО р. Енисей и хронологии поступления радионуклидов в ДО с использованием радиоизотопных методов.

2. Материалы и методы

Для исследований использовали керны ДО, отобранных в пойме реки Енисей в зоне влияния ГХК на расстоянии до 1580 км (вблизи Полярного круга) по течению реки от г. Красноярска. Керны ДО, отобранные вблизи села Балчуг (15 км по течению реки от ГХК – 97 км по течению реки от г. Красноярска), характеризуют ДО ближней зоны влияния ГХК. Керны ДО, отобранные вблизи сел Захаровка, Новоазимово, Комса, Курейка (на расстоянии от 272 до 1580 км от Красноярска) характеризуют ДО дальней зоны влияния ГХК. Для отбора использовали стальные пробоотборники – трубы разной длины с диаметром 11 см и лепестковым затвором. На месте пробоотбора керны ДО разрезали на слои по 2-4 см. В лаборатории высушенные пробы ДО

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: radecology@gmail.com (А.Я. Болсуновский)

Поступила: 30 мая 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



анализировали на содержание техногенных радионуклидов ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{154}Eu и природных ^{210}Pb , ^{214}Pb на γ -спектрометре GX2320 “Canberra” (USA) со сверхчистым германиевым детектором. Для расчета скорости осадконакопления использовали методы неравновесного ^{210}Pb , отношения техногенных радионуклидов и метод реперных радионуклидов.

3. Результаты и обсуждение

Анализ кернов ДО выявил 2-3 максимума техногенных радионуклида по глубине керна в ближней зоне влияния ГХК (с. Балчуг) и 4-5 максимумов техногенных радионуклидов для кернов дальней зоны влияния ГХК (села Захаровка, Новоазимово и Комса). При этом длина отобранных кернов ДО дальней зоны достигала 140 см. Для отдельных кернов обнаружены слои аномального содержания техногенного радионуклида ^{137}Cs (до 25000 Бк/кг) в ДО р. Енисей по течению от ГХК, достигающего категории радиоактивных отходов низкой активности. Эти слои образовались в период мощного паводка на реке Енисей в 1966 году, перенесшего большие массы ДО из района вблизи ГХК до г. Енисейска (410 км от Красноярска) и, возможно далее по течению реки. Слои донных отложений с аномальными максимумами ^{137}Cs при определенных условиях могут служить реперными маркерами даты паводка 1966 года (Bolsunovsky et al., 2021).

Для кернов ДО, отобранных после паводка 2006 года, в верхних слоях зарегистрировано повышенное содержание ^{60}Co , в том числе в форме радиоактивных микрочастиц. Эти микрочастицы были обнаружены как в ближней, так и в дальней зоне влияния ГХК (с. Комса) на расстоянии до 945 км по течению реки от г. Красноярска. Повышенное содержание ^{60}Co в верхних слоях кернов ДО, возникшее в период паводка 2006 года, может служить маркером даты (2006 г) для расчета скоростей осадконакопления. Следовательно, для многих кернов ДО р. Енисей после сбросов ГХК мы имеем два реперных радионуклида – маркера даты паводков: ^{60}Co в верхней части керна (паводок 2006 год) и ^{137}Cs в нижней части керна при определенных условиях (паводок 1966 год).

Анализ кернов ДО, отобранных вблизи ГХК (с. Балчуг), показал, что рассчитанные скорости осад-

конакопления методом отношения радионуклидов ($^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ и $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$) были в диапазоне 0.5–1.3 см/год. Этот интервал скоростей близок к интервалу скоростей осадконакопления, полученному для контрольного района реки (выше расположения ГХК) по методу неравновесного ^{210}Pb (0.5–1.0 см/год) (Вахрушев и др., 2023). Для удаленных от ГХК районов рассчитанные скорости осадконакопления методом отношения радионуклидов были в интервале от 2.0 до 3.5 см/год, что превышали полученные значения скоростей для ближней зоны вблизи с. Балчуг. Возрастание скорости осадконакопления для удаленных от ГХК районов может быть связано с изменением гидрологических условий реки после впадения крупных притоков (рек Кан, Ангара и других). Использование метода реперных радионуклидов ^{137}Cs (паводок 1966 г) и ^{60}Co (паводок 2006 г) для расчета скоростей осадконакопления удаленного участка реки в большинстве случаев соответствовало скоростям, полученным методом отношения $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$.

Рассчитанные скорости осадконакопления позволяют определить хронологию поступления ^{137}Cs и других радионуклидов в ДО р. Енисей. В качестве примера на рисунке 1 приведена хронология поступления техногенных радионуклидов в ДО вблизи с. Захаровка на удалении 272 км от г. Красноярска. Для данного керна скорости осадконакопления, рассчитанные на основании отношения радионуклидов $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ (2.3 см/год) и реперного ^{60}Co (2.2 см/год) совпали. Как следует из рис. 1А, максимумы содержания ^{137}Cs в слоях ДО этого района сформировались в 1976-77, 1982-84, 1988-91 и 1994-1997 годах. Один из максимумов ^{137}Cs (1988-91) очевидно связан с крупным паводком на реке Енисей в 1988 году. Максимумы содержания ^{60}Co в слоях ДО этого района сформировались в 1995-98, 2006 и 2010 годах. Один из максимумов ^{60}Co (2006) однозначно связан с крупным паводком на реке в 2006 году (рис. 1А). Основные максимумы содержания ^{152}Eu в слоях ДО (рис. 1В) этого района сформировались в 1976-77, 1982-84, 1990 и 1994-1998 года – полностью совпадают с временем формирования максимумов ^{137}Cs . Проведенный анализ показал, что один из максимумов ^{137}Cs и ^{152}Eu в ДО данного района связан с паводком 1988 года, а один из максимумов ^{60}Co – с паводком на реке

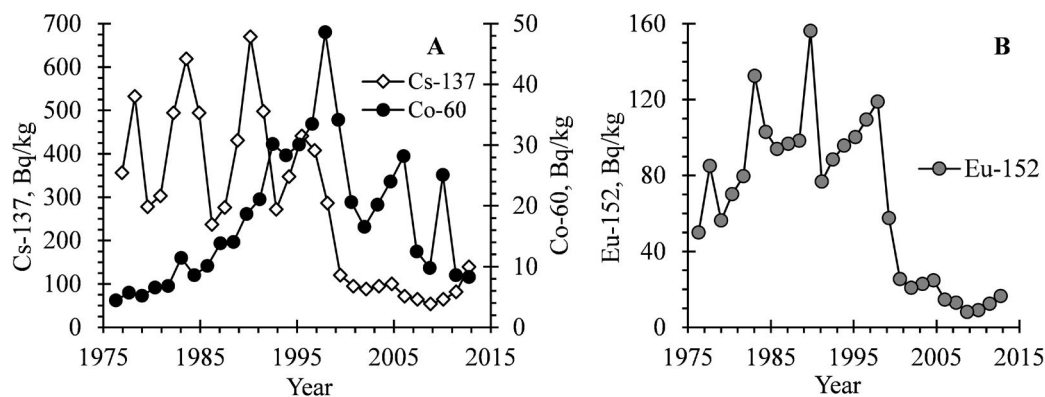


Рис.1. Пример хронологии поступления техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co (А), и ^{152}Eu (В) в донные отложения р. Енисей удаленного от ГХК района вблизи с. Захаровка.

в 2006 году. Однако другие максимумы поступления ^{137}Cs и ^{152}Eu в слои ДО датированные 1976-77, 1982-84, 1994-1997 годами, а также максимумы ^{60}Co в ДО датированные 1995-98 и 2010 годами пока не могут быть объяснены влиянием крупных паводков на реке. Возможно, эти максимумы поступления радионуклидов в ДО связаны как с неизвестными сбросами ГХК, так и с измененными гидрологическими условиями реки на этом удаленном участке. В некоторых нижних слоях кернов ДО обнаружены микрочастицы, содержащие ^{137}Cs и трансурановый элемент ^{241}Am , которые в дальнейшем могут помочь с объяснением формирования максимумов техногенных радионуклидов в ДО.

4. Заключение

Керны ДО р. Енисей вблизи ГХК (15 км) содержат 2-3 максимума техногенных радионуклидов по глубине, для дальней зоны влияния ГХК (до 1500 км) отмечены 4-5 максимумов радионуклидов в кернах, длиной до 140 см. Для удаленных от ГХК районов рассчитанные скорости осадконакопления (от 2.0 до 3.5 см/год) превышали полученные значения скоростей для ближней зоны влияния ГХК (0.5–1.3 см/год). Анализ хронологии поступления техногенных радионуклидов в ДО реки Енисей показал, что за последние 60 лет значительная часть техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{152}Eu поступала в ДО реки из зоны ГХК во время аномальных паводков 1966 и 1988 годов, ^{60}Co – во время паводка 2006 года. Существование максимумов радионуклидов в других слоях, датированных 1976-77, 1982-84, 1994-1997 годами, требует дополнительного отбора и анализа новых кернов ДО.

Финансирование

Работа выполнена частично за счет средств гранта Российского научного фонда №24-27-20003, Красноярского краевого научного фонда.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- Bolsunovsky A.Ya. 2010. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chemistry and Ecology* 26: 401–409.
- Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A. et al. 2017. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain. *Scientific Reports* 7(11132): 1–10.
- Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. 2021. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences* 498: 514–518.
- Вахрушев В.И., Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В. 2023. Использование радиоизотопных методов для хронологии поступления Cs в донные отложения реки Енисей. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле* 33(2): 178-190.
- Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М. и др. 2004. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео».

Evolution of coastal ecosystems in the Ussuriysky Bay Head since the final phase of the Middle Holocene



Belyanin P.S.*, Belyanina N.I.

The Pacific Geographical Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Radio Str., 7, Vladivostok, 690041, Russia

ABSTRACT. Pollen record obtained from sediments of the high floodplain terrace of the River Knevichanka, allowed to reconstruct the evolution of coastal vegetation in the Ussuri Bay Head over the last 5350 years cal BP. It was found that broad-leaved plants under warm and moisture climate during the final phase of the mid-Holocene Thermal Maximum were more widespread in the mountain ecosystems than at present. Mixed grass meadow, small-leaved plant communities were dominated on the accumulative plain, with common birch, hybrid birches and alder. The cooling that began at the end of the Middle Holocene and continued in the beginning of the Late Holocene led to a decrease of broad-leaved trees and a wider distribution of small-leaved ones in the vegetation. At the end of the Late Holocene, in the Ussuriysky Bay Head, were formed the oak-broadleaf forests with fir and Korean pine which represent the modern appearance of ecosystems.

Keywords: mid-Holocene Thermal Maximum, Late Holocene, palynological analysis, paleovegetation, vegetation changes

For citation: Belyanin P.S., Belyanina N.I. † Evolution of coastal ecosystems in the Ussuriysky Bay Head since the final phase of the Middle Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 280-285. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-280

1. Introduction

At the Ussuriysky Bay Head there is an extensive accumulative plain “dragging” into the valleys of the rivers Knevichanka and Artyomovka. Evolution of the ecosystems in this area during the Holocene is closely associated with both climatic fluctuations, governing the directionality of the plant development, and fluctuations of the sea level, which had a considerable impact on the environment (Korotkii, 1994; Pavlyutkin and Belyanina, 2002; Elbakidze, 2014; Anderson et al., 2017). The forming under that process sediments are the information bearing objects for the reconstruction of the history of the evolution of the environment in the past.

The aim of this work is to reconstruct the coastal vegetation evolution in the Ussuriysky Bay Head under multidirected climatic fluctuations in the final phase of the mid-Holocene Thermal Maximum optimum and in the Late Holocene.

2. Materials and methods

2.1. Collection, preparation of the sediments samples

Sections 1706–1 and 1810–1 reveal 190 and 80 cm of loose sediments of the high floodplain terrace of the Knevichanka River, respectively. Section 1706–1 is located on the right bank, 550 m downstream of the automobile bridge (N43°25′11.62″; E132°11′57.88″), at an absolute height of 2.3 m, with a water level of 0.8 m in the river. Section 1810–1 is located on the left bank 320 m upstream of the road bridge (N43°25′13.99″; E132°11′34.56″).

2.2. Palynological analysis

Sediments samples were taken at intervals of 5–10 cm. Fossil pollen particles were extracted from the sediments using standard methods, which included treatment with 10% KOH, separation of minerals with

*Corresponding author.

E-mail address: pavelbels@yandex.ru (P.S. Belyanin)

Received: May 15, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



a solution of KJ and CdJ₂ (2.2 g/cm³), after which the samples were mounted in glycerol jelly (Pokrovskaya, 1950). Pollen and spores in glycerol jelly were identified and counted using an optical microscope Axio Scope A1 at ×400 magnification. Proportion of each pollen taxon was calculated in percent of the pollen sum arboreal taxa, dwarf shrubs and herbs. Proportion of plant groups (trees and shrubs – AP, herbs, grass, and dwarf shrubs – NAP, spores – SP) was calculated in percent of the total amount of microfossils. At least 250 pollen grains of arboreal and dwarf shrubs plants were counted in each sample. Identifications of pollen grains were made with the aid of pollen atlases (Pokrovskaya, 1950; Nakamura, 1980).

2.3. Radiocarbon dating

Radiocarbon dating of samples of buried soil and plant detritus was carried out in the Laboratory of Geochronology, St. Petersburg State University (Kh.A. Arslanov and F.B. Maksimov). Obtained radiocarbon dates 3020 ± 100 BP (LU-8779) and 4650 ± 110 BP (LU-8780) were calibrated using OxCal 4.4 with the “IntCal 20” calibration curve (Ramsey, 2017; Reimer et al., 2020) to 3190 ± 130 cal BP and 5350 ± 160 cal BP respectively.

3. Results and discussion

The palynological and chronological data obtained for cross-section 1706–1 showed that sedimentation of sediments in the depth range of 190–150 cm occurred in the final phase of the optimal phase of the Middle Holocene from 5350 cal BP, under warmer climatic conditions than modern ones. The taxonomic composition of local pollen zone (LPZ) 1 indicates the widespread development on the valleys slopes of the Ussuri Bay Head of mixed forests with a predominance of *Pinus koraiensis*, *Pinus densiflora*, *Abies holophylla*, *Phellodendron amurense*, *Tilia*, *Syringa*, *Juglans mandshurica* and other broad-leaved trees. Sedge-forb meadows were dominated in the alluvial plains of the Ussuri Bay Head. Small-leaved forests with a predominance of white birch and alder were widespread along the riverbeds and lakes.

The taxonomic structure of the palynospectra of LPZ 2, identified in the depth range of 150–78 cm, indicates a cooling event that occurred at the beginning of the Late Holocene. The widespread of *Pinus koraiensis* and *Abies holophylla* vegetation decreased slightly, on the slopes of northern exposures they replaced by *Picea*. At the same time, the proportion of broad-leaved trees also decreased. The participation of small-leaved plants, primarily tree *Betula*, *Alnus* and *Duschekia*, has increased. The coastal plains in the Ussuri Bay Head were occupied by sedge and reed meadows.

High participation in LPZ 2 of spores of the *Osmunda cinnamomea*, which prefers moist and shady habitats, indicates the dominance in the valleys of the Ussuri Bay Head of closed mixed coniferous broad-leaved forests, where the substrate and forest floor maintain a high level of humidity under the monsoon climate.

LPZ 3, identified in the depth interval 78–0 cm is described of vegetation evolution at the end of the Late Holocene. The taxonomic composition of the palynospectra indicates that the distribution of *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica* has increased on the slopes in the Ussuri Bay Head valleys. Sedge-forb meadows and reed thickets were dominated in the coastal plains. The presence of lotus pollen grains indicates the existence of freshwater lakes on the coastal plains of the Ussuri Bay Head.

4. Conclusions

Changes in the taxonomic composition of palynospectra in the sediments of the first terrace above the floodplain of the Knevichanka River allowed reconstructed vegetation of the coastal ecosystems in the Ussuriysky Bay Head. They showed that under warm climate during the final phase of the mid-Holocene Thermal Maximum the polydominant forests prevailed on the coastal slopes. Broadleaved plants were widespread more widely than at the present time. On the alluvial plains were dominated by small-leaved plant communities.

The decline in heat in the Late Holocene resulted in a degradation of broad-leaved vegetation and expansion of small-leaved species. During the final phase of the Late Holocene was the time when the structure of the modern plant formations was formed. There is the principal species on the slopes included *Quercus mongolica*, *Ulmus*, *Phellodendron amurense*, *Abies holophylla*, *Juglans mandshurica* and *Syringa*. Sedge-red grass meadows and overgrowth of reeds on the alluvial plains in the Ussuriysky Bay Head dominated.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anderson P.M., Belyanin P.S., Belyanina N.I. et al. 2017. Evolution of the vegetation cover of the western coast of Peter the Great Bay in the Late Pleistocene-Holocene. *Tikhookeanskaya Geologiya [Pacific geology]* 36(4): 206–215. (in Russian)
- Elbakidze E.A. 2014. The scale of the Holocene ingression of the Sea of Japan in South Primorye. *Tikhookeanskaya Geologiya [Pacific geology]* 33(2): 102–108. (in Russian)
- Korotkii A.M. 1994. Sea level fluctuations in the Sea of Japan and coastal zone landscapes (stages of development and trends). *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniia Rossiiskoi Akademii nauk [Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences]* 3: 29–42. (in Russian)
- Nakamura J. 1980. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part I. Special Publications from the Osaka Museum of Natural History.
- Pavlyutkin B.I., Belyanina N.I. 2002. Quaternary deposits of Primorye: Some results of systematization and further prospects of study. *Tikhookeanskaya Geologiya [Pacific geology]* 21(3): 80–93. (in Russian)
- Pokrovskaya I.M. 1950. Pollen analysis. Moscow: Gosgeolizdat. (in Russian)
- Ramsey C. 2017. Methods for summarizing radiocarbon datasets. *Radiocarbon* 59: 1–25.

Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725–757.

Эволюция прибрежных экосистем в кутовой части Уссурийского залива с последней фазы среднего голоцена

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Белянин П.С.* , Белянина Н.И.

Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Радио, 7, Владивосток, 690041, Россия

АННОТАЦИЯ. Пыльцевая летопись, полученная по отложениям высокой пойменной террасы р. Кневичанки, позволила реконструировать эволюцию прибрежной растительности в кутовой части Уссурийского залива за последние 5350 лет кал. л. Определены особенности структуры растительности в заключительной фазе среднего голоценового термического максимума, а также при климатических колебаниях в позднем голоцене. Установлено, что в условиях теплого и влажного климата в заключительную фазу среднего голоцена в горных экосистемах широколиственные растения были более широко распространены, чем в настоящее время. На аккумулятивных равнинах преобладали разнотравные луга, мелколиственные растительные сообщества с доминированием березы обыкновенной, гибридной березы и ольхи. Похолодание, начавшееся в конце среднего голоцена и продолжавшееся в начале позднего голоцена, привело к сокращению участка широколиственных деревьев и более широкому распространению мелколиственных растений в растительном покрове. В конце позднего голоцена в верховьях Уссурийского залива сформировались дубово-широколиственные леса с пихтой и сосной корейской, которые представляют собой современный облик растительности.

Ключевые слова: оптимум голоцена, поздний голоцен, палинологический анализ, палеорастительность, изменения растительности

Для цитирования: Белянин П.С., Белянина Н.И.† Эволюция прибрежных экосистем в кутовой части Уссурийского залива с последней фазы среднего голоцена // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 280-285. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-280

1. Введение

В верховьях Уссурийского залива расположена обширная аккумулятивная равнина, «втягивающаяся» в долины рек Кневичанка и Артемовка. Эволюция растительности этой территории в голоцене тесно связана как с климатическими колебаниями, определявшими направленность развития растений, так и с колебаниями уровня моря (Короткий, 1994; Павлюткин и Белянина, 2002; Элбакидзе, 2014; Андерсон и др., 2017). Сформировавшиеся при этом осадки являются информативными объектами при реконструкции истории развития окружающей среды в прошлом.

Цель работы – реконструировать эволюцию прибрежной растительности в кутовой части Уссурийского залива при разнонаправленных кли-

матических колебаниях в заключительной фазе оптимума среднего голоцена и в позднем голоцене.

2. Материалы и методы

2.1. Отбор проб и подготовка лабораторных образцов

Разрезы 1706–1 и 1810–1 вскрывают толщу рыхлых отложений высокой пойменной террасы р. Кневичанки мощностью 190 и 80 см соответственно. Разрез 1706–1 заложен на правом берегу, в 550 м ниже по течению от автомобильного моста (43°25'11.62" с.ш.; 132°11'57.88" в.д.), на абсолютной высоте 2,3 м, при отметке уреза воды в реке 0,8 м. Разрез 1810–1 расположен на левом берегу, в 320 м выше по течению от автомобильного моста,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: pavelbels@yandex.ru (П.С. Белянин)

Поступила: 15 мая 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



на абсолютной высоте 1,8 м (43°25'13.99" с.ш.; 132°110'34.56" в.д.)

2.2. Палинологический анализ

Образцы из разрезов отбирались с интервалом 5–10 см. Спорово-пыльцевой анализ проведен по стандартной методике, включающей обработку 10% KOH, отделение минералов раствором KJ и CdJ₂ (2.2 г/см³), после чего образцы помещали в глицериновое желе (Покровская, 1950). Пыльцу и споры идентифицировали и подсчитывали с помощью оптического микроскопа Axio Scope A1 при увеличении ×400. Доля каждого таксона пыльцы рассчитывалась в процентах от суммы пыльцы деревьев, кустарников, трав и кустарничков. Доли групп растений (деревья и кустарники – AP, травы, злаки и карликовые кустарники – NAP, споры – SP) рассчитывали в процентах от общего количества микрофоссилий. В каждой пробе подсчитывали не менее 250 пыльцевых зерен древесных и кустарниковых растений. Идентификацию пыльцевых зерен проводили с помощью пыльцевых атласов (Покровская, 1950; Nakamura, 1980).

2.3. Радиоуглеродное датирование

Радиоуглеродное датирование образцов погребенной почвы и растительного детрита выполнено в лаборатории геохронологии СПбГУ (Х.А. Арсланов и Ф.Б. Максимов). Полученные радиоуглеродные даты 3020 ± 100 л.н. (ЛУ–8779) и 4650 ± 110 л.н. (ЛУ–8780) были откалиброваны с помощью OxCal 4.4 с калибровочной кривой «IntCal 20» (Ramsey, 2017; Reimer et al., 2020) до 3190 ± 130 кал. л. н. и 5350 ± 160 кал. л. н. соответственно.

3. Результаты и обсуждение

Полученные палинологические и хронологические данные по разрезу 1706–1 показали, что седиментация отложений в интервале глубин 190–150 см, происходило в заключительную фазу оптимальной фазы среднего голоцена с 5350 кал. л.н., в более теплых климатических условиях, чем современные. Таксономический состав локальной пыльцевой зоны (ЛПЗ) 1 свидетельствует о широком развитии на склонах долины на склонах горного обрамления кутовой части Уссурийского залива смешанных лесов с преобладанием *Pinus koraiensis*, *Pinus densiflora*, *Abies holophylla*, *Phellodendron amurense*, *Tilia*, *Syringa*, *Juglans mandshurica* и других широколиственных деревьев. На аллювиальных равнинах, примыкающих к вершине Уссурийского залива, доминировали осоково-разнотравные луга. Вдоль русел рек и озер были развиты мелколиственные леса с преобладанием белой березы и ольхи.

Таксономическая структура палиноспектров ЛПЗ 2, выделенной в интервале глубин 150–78 см, указывает на похолодание, произошедшее в начале позднего голоцена. Доля *Pinus koraiensis* и *Abies*

holophylla растительности несколько уменьшилась, уступив место *Picea* на склонах северных экспозиций. В это же время сократилась доля широколиственных деревьев. Одновременно, возросло участие мелколиственных растений, в первую очередь березы, ольхи и кустарниковой ольхи. Прибрежные равнины в кутовой части Уссурийского залива, заняли осоково-тростниковые луга.

Высокое участие в ЛПЗ 2 спор папоротника *Osmunda cinnamomea*, предпочитающего увлажненные и затененные места обитания, указывает на преобладание в бассейне р. Кневичанки сомкнутых хвойно-широколиственных лесов, в которых субстрат и лесная подстилка в муссонном климате имеют стабильно повышенную влажность.

Изменение растительности в конце позднего голоцена описывает ЛПЗ 3, выделенная в интервале 78–0 см. Таксономический состав палиноспектров свидетельствует, что на склонах долин в кутовой части Уссурийского залива возросло распространение *Pinus koraiensis* и *Quercus mongolica*. На прибрежных равнинах доминировали осоково-разнотравные луга и заросли тростника. Наличие пыльцевых зерен лотоса свидетельствует о существовании пресноводных озер на прибрежных равнинах Уссурийского залива.

4. Выводы

Пыльцевая летопись, полученная по отложениям высокой пойменной террасы р. Кневичанки, позволили реконструировать эволюцию растительности в кутовой части Уссурийского залива. Палинологические данные показали, что в условиях теплого климата в заключительную фазу оптимальной фазы среднего голоцена на прибрежных склонах преобладали полидоминантные леса, в которых широколиственные деревья были распространены более широко, чем в настоящее время.

Снижение температуры в позднем голоцене привело к сокращению участия в растительности широколиственных деревьев и усилению участия мелколиственных растений. На заключительном этапе позднего голоцена сформировалась современная структура растительности. На склонах основными компонентами стали *Quercus mongolica*, *Ulmus*, *Phellodendron amurense*, *Abies holophylla*, *Juglans mandshurica* и *Syringa*. На прибрежных равнинах Уссурийского залива широкое развитие получили осоково-разнотравные луга и заросли тростника.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Андерсон П.М., Белянин П.С., Белянина Н.И. и др. 2017. Эволюция растительного покрова западного побережья залива Петра Великого в позднем плейстоцене-голоцене. Тихоокеанская геология 36(4): 206–215.

Элбакидзе Е.А. 2014. Масштабы голоценового вклинивания Японского моря в Южном Приморье, Тихоокеанская геология 33(2): 102–108.

Короткий А.М. 1994. Колебания уровня Японского моря и ландшафты прибрежной зоны (этапы развития и тенденции). Бюллетень Дальневосточного отделения Российской Академии Наук 3: 29–42.

Павлюткин Б.И., Беянина Н.И. 2002. Четвертичные отложения Приморья: Некоторые итоги систематизации и дальнейшие перспективы изучения. Тихоокеанская геология 21(3): 80–93.

Покровская И.М. 1950. Пыльцевой анализ. Москва: Госгеоллиздат.

Nakamura J. 1980. Diagnostic characters of pollen grains of Japan, Part I. Special Publications from the Osaka Museum of Natural History, Osaka, Japan 13: 1–91.

Ramsey C. 2017. Methods for summarizing radiocarbon datasets. Radiocarbon 59: 1–25.

Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon 62(4): 725–757.

Polyunsaturated long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk valley (southern Siberia) as a paleo-indicator of climate change

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Bulkhin A.O.^{1*}, Zykov V.V.¹, Boyandin A.N.¹, Marchenko D.N.^{1,2}, Anishchenko O.V.¹, Kabilov M.R.³, Rogozin D.Y.^{1,2}

¹Institute of Biophysics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IBP SB RAS), Akademgorodok Str., 50/50, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660036, Russia;

²Siberian Federal University (SibFU), 79 Svobodny Pr., Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660041, Russia;

³Institute of Chemical Biology and Fundamental Medicine Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The research of biochemical thermo- and salt-sensitive markers - long-chain alkenones in sediments of lakes of the North Minusinsk valley is an important contribution to the understanding of climatic changes in this region. We found that the total concentration of alkenones in the top layers of bottom sediments of saline lakes increases significantly at a salinity of about 20 g l⁻¹. Also, it was found that the average chain length of alkenones in the surface sediments rises with increasing salinity and thus can be used as an indicator of salinity, and the ratio of alkenones C₃₇/C₃₈ varies widely, suggesting that this index can be used as a paleo-indicator of salinity. The high correlation between U_{40}^K , $U_{40}^{K'}$ and $U_{3738}^{K'}$ indices with salinity indicates their potential for paleosalinity reconstruction. The obtained functional dependences were additionally verified in the core of bottom sediments of Lake Utichie-3 and confirmed the possibility of using alkenones as a paleo-indicator of climatically determined salinity changes in endorheic lakes. The taxonomic composition of haptophyte algae and alkenone composition in the studied lakes were comparable to lakes in prairie regions of North America.

Keywords: long-chain alkenones, salinity indicator, lake sediments, haptophyte algae, South Siberia, paleoclimatology

For citation: Bulkhin A.O., Zykov V.V., Boyandin A.N., Marchenko D.N., Anishchenko O.V., Kalugin I.A., Rogozin D.Y. Polyunsaturated long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk valley (southern Siberia) as a paleo-indicator of climate change // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 286-291. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-286

1. Introduction

The climate fluctuation patterns in high latitudes of Asia, such as Siberia, remain poorly understood (Novenko et al., 2022). The North Minusinsk hollow is of special interest for paleoclimatic research. The lake sediments are one of the best natural «records» of climate. In arid and semi-arid regions, the water level of endorheic lakes responds sensitively to the «precipitation-evaporation» balance by changes in water volume and salinity. However, there are currently no reliable universal paleo-indicators of salinity. For the time being, the most promising are thermo- and salt-sensitive biochemical markers – polyunsaturated long-chain alkenones (LCA). LCA is C₃₅-C₄₂ methyl- and ethyl ketones with 2-4 double bonds synthesized by haptophytic algae of the order Isochrysidales. In continental water bodies, temperature reconstruction by LCA is complicated due to the presence of several species that respond differently to temperature, but salinity reconstruction is no less important, and active research in this direction is currently underway (Zhao et al., 2014; Bulkhin et al., 2023). Functional correlations obtained by comparing LCA composition in surface sediment layers with salinity (core-top calibrations) are indirect, and their best verification is the analysis of LCA in the core of Lake Utichie-3 (down-core studies), for which instrumental observations of salinity and water level are available. Thus, the purpose of current study is to analyze the dependence of the composition of long-chain alkenones and their producers on physicochemical environmental factors in lake sediments of the

phytic algae of the order Isochrysidales. In continental water bodies, temperature reconstruction by LCA is complicated due to the presence of several species that respond differently to temperature, but salinity reconstruction is no less important, and active research in this direction is currently underway (Zhao et al., 2014; Bulkhin et al., 2023). Functional correlations obtained by comparing LCA composition in surface sediment layers with salinity (core-top calibrations) are indirect, and their best verification is the analysis of LCA in the core of Lake Utichie-3 (down-core studies), for which instrumental observations of salinity and water level are available. Thus, the purpose of current study is to analyze the dependence of the composition of long-chain alkenones and their producers on physicochemical environmental factors in lake sediments of the

*Corresponding author.

E-mail address: bulkhinlive@yandex.ru (A.O. Bulkhin)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** August 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



North Minusinsk valley, and to assess the possibility of using alkenones as proxy for paleolimnological reconstructions of salinity.

2. Methods

In July 2019, May 2020 and July 2021, surface sediment samples were collected from the central part of 22 lakes located in the North-Minusinsk valley using a corer sampler UWITEC (Austria). In March 2015, a 67 cm long core of bottom sediments was extracted from the central part of Lake Utichie-3 through a hole in the ice. The top layers of bottom sediments with a thickness of 1 cm were placed in airtight polyethylene bags with the air removed and stored at -20 °C.

The sediments of Lake Utichie-3 were dated based on the distribution of ^{137}Cs , ^{210}Pb , and ^{226}Ra isotope activities. The measurements were carried out by employees of the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk). Before sampling, a YSI EXO2 multi-parameter water quality sonde (Yellow Springs, Ohio, USA) was used to measure vertical profiles of temperature, conductivity, dissolved oxygen content, and redox potential. The chemical composition of water was analyzed in the analytical laboratory of the Institute of Biophysics, SB RAS. For DNA analysis of haptophyte algae, water samples were collected near sediment sampling sites from 13 lakes in which alkenones were detected. DNA extraction, amplification, and sequencing were performed at the Genomics Core Facility SB RAS (ICBFM SB RAS, Novosibirsk). Phylogenetic tree construction was performed using the MEGA X molecular evolutionary genetics analysis program.

Long-chain alkenones were extracted 24 h with a mixture of chloroform and methanol (7:3, v/v) with 50 μL of hexatriacontane (C_{36}). The mixture was filtered, evaporated, then saponified with 5 mL of 6% KOH to separate fatty acids from neutral lipids. A GC-MS 7890/5975C gas chromatograph (Agilent Technologies, USA) with a VF-200MS capillary column (60 m \times 250 μm \times 0.10 μm) was used to separate the components.

Redundancy analysis (RDA) was performed in the R software environment (<http://www.R-project.org>; R Development Core Team) using “vegan” package. To make the data more comparable and to eliminate the influence of measurement scale, all data were $\log + 1$ transformed and standardized by Hellinger.

3. Results and discussion

The lakes differed significantly in salinity and other characteristics. Salinity ranged from 0.02 to 44 g l^{-1} and depth ranged from 0.9 to 44 m. The four lakes in which alkenones were not detected were freshwater lakes. The alkenone concentrations in surface sediments varied widely from 4 to 7400 $\mu\text{g (g dry sediment)}^{-1}$ and increased at salinities around 20 g l^{-1} . These results indicate the possibility of using alkenones as a qualitative indicator of transitions through the critical value of 20 g l^{-1} in paleoreconstructions of saline lakes with sig-

nificant fluctuations in water level (and, consequently, salinity). The obtained data for the studied lakes confirm the conclusions of Zhao et al. (2014) that the average chain length of alkenones in surface sediments increases with increasing salinity and can be used as an indicator of salinity. The $\text{C}_{37}/\text{C}_{38}$ alkenone ratio ranged from 1.11 to 3.54, which indicates the possibility of using this index as a paleo-indicator of salinity. The found correlation between U_{40}^K and $U_{40}^{K'}$ indices with salinity indicates their potential for paleosalinity reconstruction. Also a positive correlation with salinity of the $U_{3738}^{K'}$ index was found. The data were analysed using the RDA (redundancy analysis) method. The lakes were divided into three groups: saline stratified, freshwater and other saline lakes. Alkenones were detected only in the saline lakes present in the first and third groups. The total content of alkenones was strongly correlated with salinity.

The age of the sediment core from Lake Utichie-3 was about 150 years. The alkenone content qualitatively reflected the changes in lake salinity, in particular, it increased with the recorded increase in salinity in the sediments corresponding to the period of the 1920s. The indexes U_{40}^K , $U_{40}^{K'}$, $U_{3738}^{K'}$, as well as the average chain length and $\text{C}_{37}/\text{C}_{38}$ ratio showed a positive correlation with salinity identical to that observed in a study of surface sediments (core-top study), which generally confirms the conclusions that DCA content in sediments reflects changes in lake level and salinity and can be used as a paleo-indicator for reconstructing these characteristics.

Four phylotypes belonging to the order Isochrysidales were found in samples from 13 lakes. Phylogenetic analysis showed that these phylotypes belong to Group 2 alkenone-producers, which is typical of saline continental lakes. Genetically similar related sequences were found in Canadian Prairies lakes, which can be explained by similar habitat conditions. Only in the slightly saline Lake Matarak a phylotype belonging to Group 1, which is specific for freshwater lakes.

4. Conclusions

The content of DCA in saline lakes of the North Minusinsk valley depends on salinity. In freshwater lakes, alkenones are not detected, whereas in saline lakes their content reaches a maximum at a salinity of about 20 g l^{-1} . Thus, DCA in bottom sediments can be used as a paleo-indicator of lacustrine salinity. Analysis of the bottom sediment core of Lake Utichie-3 confirmed that the alkenone content reflects changes in water level and salinity. Thus, DCA can be used as a paleo-indicator of climate-driven changes in salinity in endorheic lakes and, consequently, of climate humidity. The taxonomic composition of alkenone-producers in salt lakes of the North Minusinsk valley is comparable to other regions of the world with similar climatic conditions, for example, in prairie regions of North America.

Acknowledgements

This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00185 <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Bulkhin A.O., Zykov V.V., Marchenko D.N. et al. 2023. Long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk Valley (southern Siberia): implications for paleoclimate reconstructions. *Organic Geochemistry* 176(2023): 104541. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2022.104541](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2022.104541)

Novenko E.Y., Rudenko N.G., Mazei N.G. et al. 2022. Late Holocene vegetation and fire history in Western Putorana Plateau (subarctic Siberia, Russia). *The Holocene* 32(5): 433–441. DOI: [10.1177/09596836221074034](https://doi.org/10.1177/09596836221074034)

Zhao J., An C., Longo W.M. et al. 2014. Occurrence of extended chain lengths C₄₁ and C₄₂ alkenones in hypersaline lakes. *Organic Geochemistry* 75(2014): 48–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.06.006)

Полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны в отложениях озер Северо-Минусинской долины (Южная Сибирь), как палео-индикатор климатических изменений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Бульхин А.О.^{1*}, Зыков В.В.¹, Бояндин А.Н.¹, Марченко Д.Н.^{1,2}, Анищенко О.В.¹, Кабилов М.Р.³, Рогозин Д.Ю.^{1,2}

¹ Институт биофизики, Сибирское отделение Российской Академии Наук (ИБФ СО РАН), ул. Академгородок, 50/50, Красноярский край, Красноярск, 660036, Россия;

² Сибирский Федеральный Университет (СФУ), пр. Свободный 79, Красноярский край, Красноярск, 660041, Россия;

³ Институт химической биологии и фундаментальной медицины, Сибирское отделение Российской Академии Наук, пр. Академика Лаврентьева 8, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследование биохимических термо- и солечувствительных маркеров длинноцепочечных алкенонов в донных отложениях озер Северо-Минусинской котловины является важным вкладом в понимание климатических изменений данного региона. Было выявлено, что общее содержание алкенонов в поверхностных слоях донных отложений соленых озер значительно увеличивается при солёности около 20 г л⁻¹. Также обнаружено, что средняя длина цепи алкенонов в поверхностных слоях увеличивается с увеличением солёности и может служить ее индикатором, а соотношение алкенонов C₃₇/C₃₈ колеблется в широких пределах, что указывает на возможность использования данного индекса в качестве палео-индикатора солёности. Высокая корреляция между индексами U_{40}^K , $U_{40}^{K'}$ и $U_{3738}^{K'}$ с солёностью, указывает на их потенциал для реконструкции палеосолёности. Полученные функциональные зависимости были дополнительно проверены в керне донных отложений озера Утичьё-3 и подтвердили возможность использования алкенонов в качестве палео-индикатора климатически обусловленных изменений солёности в бессточных озерах. Таксономический состав гаптофитовых водорослей и состав алкенонов в исследуемых озерах были сопоставимы с озерами степных районов Северной Америки.

Ключевые слова: длинноцепочечные алкеноны, индикатор солёности, донные отложения, гаптофитовые водоросли, Южная Сибирь, палеоклиматология

Для цитирования: Бульхин А.О., Зыков В.В., Бояндин А.Н., Марченко Д.Н., Анищенко О.В., Калугин И.А., Рогозин Д.Ю. Полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны в отложениях озер Северо-Минусинской долины (Южная Сибирь), как палео-индикатор климатических изменений // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 286-291. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-286

1. Введение

Модели климатических флуктуаций в высоких широтах Азии, таких как Сибирь, изучены недостаточно (Novenko et al., 2022). Северо-Минусинская котловина представляет большой интерес для палеоклиматических исследований. Донные отложения озер – один из лучших природных «архивов» климата. В аридных и полуаридных регионах уровень воды бессточных озер чувствительно реагирует на баланс «осадки-испарение» изменением объема воды и солёности, однако надежных универсальных палео-индикаторов солёности пока нет. В последнее

время наиболее перспективными являются термо- и солечувствительные биохимические маркеры – полиненасыщенные длинноцепочечные алкеноны (ДЦА). ДЦА – это C₃₅-C₄₂ метил- и этилкетоны с 2-4 двойными связями, синтезируемые гаптофитовыми водорослями порядка Isochrysidales. В континентальных водоемах реконструкция температуры по ДЦА затруднена из-за присутствия нескольких видов, по-разному реагирующих на температуру, однако реконструкция солёности является не менее важной задачей, и в настоящее время ведутся активные исследования в этом направлении (Zhao et al.,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bulkhinlive@yandex.ru (А.О. Бульхин)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 28 августа 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2014; Bulkhin et al., 2023). Функциональные зависимости, полученные путем сравнения состава ДЦА в поверхностных слоях осадков с соленостью (core-top калибровки) – является косвенными, и их лучшей проверкой является анализ ДЦА в керне озера Утичьё-3 (down-core), для которого имеются инструментальные наблюдения за соленостью и уровнем воды. Таким образом, целью настоящего исследования является анализ зависимости состава длинноцепочечных алкенонов и их продуцентов от физико-химических факторов среды в донных отложениях озер Северо-Минусинской котловины, а также оценка возможности использования алкенонов в качестве индикаторов для палеолимнологических реконструкций солености.

2. Материалы и методы

В июле 2019 года, мае 2020 года и июле 2021 года из центральной части 22 озер, расположенных в Северо-Минусинской котловине, с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) были взяты пробы поверхностных отложений. В марте 2015 года из центральной части озера Утичьё-3 через прорубь во льду был извлечён керн донных отложений длиной 67 см. Донные отложения озера Утичьё-3 были датированы на основе распределения активностей изотопов ^{137}Cs , ^{210}Pb и ^{226}Ra . Измерения проводились сотрудниками Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Перед отбором проб использовали погружной многоканальный зонд YSI EXO2 (Yellow Springs, Ohio, USA) для измерения вертикальных профилей температуры, проводимости, содержания растворённого кислорода и редокс-потенциала. Для анализа ДНК гаптофитовых водорослей отбирались пробы воды вблизи мест отбора донных отложений из 13 озер, в которых были обнаружены алкеноны. Выделение, амплификацию и секвенирование ДНК осуществляли в ЦКП «Геномика» СО РАН (ИХБФМ СО РАН, г. Новосибирск). Для построения филогенетического дерева использовалась программа анализа молекулярной эволюционной генетики MEGA X.

Длинноцепочечные алкеноны экстрагировали 24 часа смесью хлороформа и метанола (7:3, v/v) с 50 мкл гексатриаконтана (C_{36}). Смесью фильтровали, выпаривали, затем омыляли 5 мл 6% КОН для отделения жирных кислот от нейтральных липидов. Для разделения компонентов использовали газовый хроматограф ГХ-МС 7890/5975C (Agilent Technologies, США) с капиллярной колонкой VF-200MS (60 м × 250 мкм × 0.10 мкм).

В программной среде R (<http://www.R-project.org>; R Development Core Team) выполняли многомерный анализ методом RDA (redundancy analysis, анализ избыточности) с использованием пакета *vegan*. Чтобы сделать данные более сопоставимыми и устранить влияние масштабов измерений, все данные предварительно были (log+1) трансформированы и стандартизованы по Хеллинджеру (Hellinger).

3. Результаты и обсуждение

Озера значительно различались по солености и другим характеристикам. Соленость варьировала от 0.02 до 44 г л⁻¹, а глубина — от 0.9 до 44 м. Четыре озера, в которых не детектировались алкеноны были пресными. Содержание алкенонов в поверхностных слоях донных отложений менялось в широком диапазоне от 4 до 7400 мкг (г сухого осадка)⁻¹ и увеличивалось при соленостях около 20 г л⁻¹. Эти результаты указывают на возможность использования алкенонов в качестве качественного индикатора переходов через критическое значение 20 г л⁻¹ при палеорекострукциях соленых озер со значительными колебаниями уровня воды (и, следовательно, солености). Полученные результаты по исследованным озерам подтверждают выводы Zhao et al. (2014) о том, что средняя длина цепи алкенонов в поверхностных отложениях увеличивается с увеличением солености и может служить ее индикатором. Соотношение алкенонов $\text{C}_{37}/\text{C}_{38}$ варьировалось от 1.11 до 3.54, что указывает на возможность использования данного индекса в качестве палео-индикатора солености. Обнаруженная корреляция между индексами U_{40}^K и $U_{40}^{K'}$ с соленостью указывает на их потенциал для реконструкции палеосолености. Также была выявлена положительная корреляция с соленостью индекса $U_{3738}^{K'}$. Полученные данные были проанализированы с использованием метода RDA (анализ избыточности). Озера разделились на три группы: соленые стратифицированные, пресные и другие соленые озера. Алкеноны были обнаружены только в соленых озерах, присутствующих в первой и третьей группах. Общее содержание алкенонов сильно коррелировало с соленостью.

Возраст керна из озера Утичьё-3 составил около 150 лет. Содержание алкенонов качественно отражало изменения солености озера, в частности, оно увеличивалось с задокументированным увеличением солености в слоях, соответствующих периоду 1920-х годов. Индексы U_{40}^K , $U_{40}^{K'}$, $U_{3738}^{K'}$, а также средняя длина цепи и отношение $\text{C}_{37}/\text{C}_{38}$ показали положительную корреляцию с соленостью, аналогичную наблюдаемой в исследовании поверхностных слоев донных отложений (core-top исследовании), что в целом подтверждает выводы о том, что содержание ДЦА в донных отложениях отражает изменения уровня и солености воды в озере и может использоваться в качестве палео-индикатора для реконструкции этих характеристик.

В образцах из 13 озер было обнаружено четыре филопита, принадлежащих к порядку Isochrysidales. Филогенетический анализ показал, что эти филопиты относятся к Группе 2 алкенон-продуцентов, которая характерна для соленых континентальных озер. Близкие генетически родственные последовательности были обнаружены в озерах Канадских прерий, что можно объяснить схожими условиями обитания. Только в слабосоленом озере Матарак был обнаружен филопит Группы 1, характерный для пресных озер.

4. Заключение

Содержание ДЦА в соленых озерах Северо-Минусинской котловины зависит от солености. В пресных водоемах алкеноны не обнаружены, тогда как в соленых их содержание достигает максимума при солености около 20 г л⁻¹. Таким образом, ДЦА в донных отложениях могут использоваться как палео-индикатор солености озера. Анализ керн донных отложений озера Утиче-3 подтвердил, что содержание алкенонов отражает изменения уровня и солености воды. Таким образом, ДЦА могут использоваться как палео-индикатор климатически обусловленных изменений солености в бессточных озерах, а следовательно, и влажности климата. Таксономический состав алкенон-продуктов в соленых озерах Северо-Минусинской котловины аналогичен составу продуктов других регионов мира с подобными климатическими условиями, например, в степных районах Северной Америки.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, грант № 22-17-00185 <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185/>.

Конфликт интересов

Авторы не имеют конфликта интересов.

Список литературы

- Bulkhin A.O., Zykov V.V., Marchenko D.N. et al. 2023. Long-chain alkenones in the lake sediments of North-Minusinsk Valley (southern Siberia): implications for paleoclimate reconstructions. *Organic Geochemistry* 176(2023): 104541. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2022.104541](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2022.104541)
- Novenko E.Y., Rudenko N.G., Mazei N.G. et al. 2022. Late Holocene vegetation and fire history in Western Putorana Plateau (subarctic Siberia, Russia). *The Holocene* 32(5): 433–441. DOI: [10.1177/09596836221074034](https://doi.org/10.1177/09596836221074034)
- Zhao J., An C., Longo W.M. et al. 2014. Occurrence of extended chain lengths C₄₁ and C₄₂ alkenones in hypersaline lakes. *Organic Geochemistry* 75(2014): 48–53. DOI: [10.1016/j.orggeochem.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2014.06.006)

Vegetation and climate of southern Siberia in the Late Holocene at decadal resolution: a multiproxy study of the Lake Shira lacustrine sediments, Minusa Basin



Bezrukova E.V.^{1,*}, Reshetova S.A.¹, Amosova A.A.¹, Shchetnikov A.A.², Zykov V.V.³, Chubarov V.M.¹, Bulkhin A.O.¹, Filinov I.A.¹, Krainov M.A.¹, Rogozin D.Y.³

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Favorsky St., 1A, Irkutsk, 66403, Russia

² Institute of the Earth Crust SB RAS, Lermontov St., 128, Irkutsk, 66403, Russia

³ Institute of Biophysics SB RAS, Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

ABSTRACT. New AMS¹⁴C-dated records of changes in the natural environment of southern Siberia from varve sediments of Lake Shira (Minusinsk Basin) are presented. The results allow reconstructing the history of vegetation, biomes, climate, relative productivity of the lake system, changes in the lake catchment erosion, and water levels in the lake itself over the past 2980 cal. years with an average temporal resolution of 21 years. The new reconstructions indicate a wet regional climate between 2980 and 2650 cal yr BP and its gradual aridization later. At the same time, the climate of the basin itself was more arid, thus providing the development of steppe and meadow-steppe communities around the lake in the last 2980 years. Variations in the *Artemisia*/*Chenopodiaceae* pollen ratio, considered as an indicator of moisture available to plants, suggest a slight increase in the moisture level in the Minusa Basin from 2980 to 50 cal yr BP and its noticeable decrease in the last 50 years. Reconstructions show that changes in vegetation around Lake Shira in the Late Holocene were mainly caused by large-scale circulation processes that changed the regional moisture balance. Steppe vegetation turned out to be very sensitive to moisture changes on a decadal scale. No clear pollen indicators of anthropogenic impact on vegetation were found in the new pollen record.

Keywords: palynomorphs, variations of regional moistening, large-scale circulation processes, anthropogenic impact

For citation: Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Amosova A.A., Shchetnikov A.A., Zykov V.V., Chubarov V.M., Bulkhin A.O., Filinov I.A., Krainov M.A., Rogozin D.Y. Vegetation and climate of southern Siberia in the Late Holocene at decadal resolution: a multiproxy study of the Lake Shira lacustrine sediments, Minusa Basin // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. - № 4. - P. 292-297. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-292](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-292)

1. Introduction

The bottom sediments of Lake Shira are recognized as the most valuable archive of Holocene climate changes due to the presence of annually laminated series - varves in its sediments (Kalugin et al., 2013), which makes it possible to obtain reconstructions of the natural environment with season-decadal resolution. The proposed new palynological record from the upper part of the Shira-2021-II-1 core is 530 years older than the previous one (Hildebrandt et al., 2015), allowing us to reconstruct the history of the natural environment for the last 2980 years.

2. Materials and methods

The close, meromictic, saline Lake Shira is located in the Khakassky State Nature Reserve. The surface area of the lake is 36 km², maximum water depth is 25 m. The lake is fed by the Son River. Other sources of water are groundwater and atmospheric precipitation (Kalugin et al., 2013). The climate of the area is continental, arid. The vegetation in the north of the Minusa Basin is dominated by steppes and forest-steppes. The foothills are occupied by forests consisting of larch *Larix sibirica* and, to a lesser extent, pine *Pinus sylvestris*. Forests of birch *Betula*, pine, spruce *Picea obovata*,

*Corresponding author.

E-mail address: bezrukova@igc.irk.ru (E.V. Bezrukova)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



fir *Abies sibirica*, Siberian pine *Pinus sibirica* form the mountain taiga belt of the ridges around the basin. In the vicinity of Lake Shira, meadow-steppe associations with the dominance of grass Poaceae, legumes Fabaceae, complex-flowered Asteraceae, wormwood *Artemisia* prevail. Larch, birch, poplar *Populus*, pine, elm *Ulmus pumila*, willow *Salix* grow along the shores. In 2021, in the deepest part of the lake, the UWITEC drilling station drilled a borehole through the bottom sediments to bedrock, with core sampling of the undisturbed structure. To date, the upper, 144-cm portion of the sediment section from borehole Shira-2021-II-1 has been studied. The age-depth model is based on ^{14}C dating with accelerator mass-spectrometry. Every centimeter of sediment was analyzed for palynological, X-ray fluorescence analysis, and physical property determinations. Green algae cells, micro-charcoals larger than 100 μm were counted on pollen slides.

3. Results and discussion

The sediments in the Shira-2021-II-1 core were formed during the last 2980 years and are represented by an alternation of multicolored layers, within which thin-laminated layering is traceable. The sediment composition is dominated by clay fraction. The reconstructions suggest the development of meadow-steppe associations on the plains of the north of the Minusa Basin. On the tops of hills larch was growing in the continental and insufficiently humid climate of the basin 2980-2650 BP, which is also supported by low values of A/Ch ratio. However, the elevated values of the cool coniferous forest biome indicate more humid conditions in the mountainous frame of the basin, which corresponds to the humid and cool climate of the Sayan-Altai region 3000-2300 BP (Bronnikova et al., 2018). It is important to note that 2950-2750 BP the lake accumulated organic matter-poor “whitish” silts, which are characteristic of the intervals of the holomictic state of the lake system and lowered water level (Kalugin et al., 2013). Probably, the colder climate could have contributed to reduced evaporation/increased moisture and the emergence of favorable conditions for dark coniferous tree species in the mountains.

Later, 2650-880 BP, the role of meadow-steppe associations increased in the north of the Minusa Basin. In the surrounding mountains, the dark coniferous species decreased or their lower limit increased. Reconstructions suggest a continental, insufficiently humid regional climate, which, however, was interrupted by short episodes of increased moisture, as evidenced by the maximum A/Ch values of 2040, 1980, and 1850 BP. The layer of “whitish” silts, corresponding to cooling, was formed 2090-1950 BP. Cooling resulted in reduced evaporation, providing sufficient moisture for meadow-steppe communities and the cold deciduous forest biome 2650-880 BP.

Forb-grass steppes kept prevailing between 880-50 BP. Since 120-100 BP, wet habitats favorable to poplar, Ranunculaceae, Cyperaceae, appeared along the lake shores, possibly indicating an expansion of the

riparian/shallow-water zone.

The increased role of birch in the last 50 years coincides in time with a similar event from the LS09 record, confirming the reliability of the age models of both records and their high temporal resolution. The spread of birch could be a consequence of the transformation of local landscapes due to the construction of resort areas around Lake Shira (Hildebrandt et al., 2015). The dramatically increased input of sand and silt size particles into the lake in the last 50 years may also be a consequence of increased anthropogenically-induced erosion along with aeolian input.

Comparison of the micro-charcoals input variations in the Shira-2021-II-1 record with the sequence of Bronze and Iron Age cultures in Khakassia (Blyakharchuk and Chernova, 2013) demonstrates an increased micro-charcoals input in the final Tagar culture, middle Tashtyk, first half of the Kyrgyz cultures, and in the modern period. Moreover, the last 50-40 years are characterized by a constantly high input of micro-charcoals into the sediments of Lake Shira.

Comparison of A/Ch variations with air temperature fluctuations in the North Atlantic Region shows that during the last 2980 years, nearly every A/Ch peak has its counterpart in the in the NGRIP isotope-oxygen record from Greenland. This may imply that the moisture conditions in the north of the Minusa Basin reflect the decadal variability in the North Atlantic temperature westerly-associated moisture transport.

4. Conclusion

The record of pollen and non-pollen palynomorphs extracted from the annually laminated sediment of Lake Shira covers the past 2980 year with an average 21-year resolution. This unique sedimentary archive allows a detailed reconstruction of the lake ecosystem development, and regional vegetation and climate dynamics.

The reconstructions show a relatively wet regional climate at 2980-2650 BP and a more arid sub-regional climate in the basin. Variations in the A/Ch ratio suggest a slight increase in moisture in the basin between 2980 and 50 BP and a marked decrease in the last 50 years. However, this increase was interrupted by short intervals of increased climate aridization. The maximum input of micro-charcoals for the last 2980 years falls on the existence of Takshtyk, Kyrgyz cultures and the Russian period, but whether it was caused by anthropogenic influence only it is difficult to determine at this stage of research.

The reconstructions showed that changes in the vegetation around Lake Shira in the late Holocene were mainly due to large-scale circulation processes that changed the moisture balance in the region. In the new pollen record, as in the previous one, no clear pollen indicators of anthropogenic influence on vegetation were found. Only a noticeable increase in birch pollen in the last 50 years may indicate landscaping around resort areas.

Acknowledgements

The authors thank E.V. Kerber for elaborating the age model of the Shira-2021-II-1 core.

Funding

The research was financially supported by Russian Science Foundation, grant No. 23-17-00067.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Blyakharchuk T.A., Chernova N.A. 2013. Vegetation and climate in the Western Sayan Mts according to pollen data

from Lugovoe Mire as a background for prehistoric cultural change in southern Middle Siberia. *Quaternary Science Reviews* 75: 22-42. DOI: [10.1016/j.quascirev.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.05.017)

Bronnikova M.A., Konoplianikova Y.V., Agatova A.R. et al. 2018. Holocene Environmental Change In South-East Altai Evidenced By Soil Record. *Geography, Environment, Sustainability* 11: 100-111. DOI: [10.24057/2071-9388-2018-11-4-100-111](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-4-100-111)

Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A. et al. 2015. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 426: 75-84. DOI: [10.1016/j.palaeo.2015.02.037](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.037)

Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. 2013. Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International* 290-291: 245-252. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.09.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016)

Растительность и климат юга Сибири в позднем голоцене с декадным разрешением: результаты комплексного изучения донных отложений оз. Шира, Минусинская котловина



Безрукова Е.В.^{1*}, Решетова С.А.¹, Амосова А.А.¹, Щетников А.А.², Зыков В.В.³,
Чубаров В.М.¹, Бульхин А.О.³, Филинов И.А.², Крайнов М.А.¹, Рогозин Д.Ю.³

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1А Иркутск, 66403, Россия

²Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 66403, Россия

³Институт биофизики СО РАН, Академгородок, 50, 660036 Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ. Резюме Представлены новые, AMS¹⁴C датированные записи изменения природной среды юга Сибири из варвовых отложений оз. Шира (Минусинская котловина). Результаты позволили реконструировать историю растительности, биомов, климата, относительной продуктивности озерной системы, изменение эрозии в водосборном бассейне и уровня воды в самом озере за последние 2980 калибр. лет со средним временным разрешением в 21 год. Новые реконструкции указывают на влажный региональный климат 2980-2650 л.н. и его постепенную аридизацию позднее. При этом климат самой котловины был ариднее, обеспечивая развитие степных и лугово-степных группировок вокруг озера в последние 2980 лет. Вариации отношения пыльцы *Artemisia/Chenopodiaceae*, рассматриваемого как показатель доступной растениям влаги, предполагают небольшое повышение уровня влаги в Минусинской котловине 2980 – 70 л.н. и его заметное снижение в последние 70 лет. Реконструкции показали, что изменения растительности вокруг озера Шира в позднем голоцене были обусловлены, главным образом, крупномасштабными циркуляционными процессами, менявшими баланс влаги в регионе. Наиболее чувствительными к изменениям увлажнения в декадном масштабе оказались степные группировки. В новой пыльцевой записи не было найдено четких пыльцевых показателей антропогенного влияния на растительность.

Ключевые слова: палиноморфы, вариации регионального увлажнения, крупномасштабные циркуляционные процессы, антропогенное воздействие

Для цитирования: Безрукова Е.В., Решетова С.А., Амосова А.А., Щетников А.А., Зыков В.В., Чубаров В.М., Бульхин А.О., Филинов И.А., Крайнов М.А., Рогозин Д.Ю. Растительность и климат юга Сибири в позднем голоцене с декадным разрешением: результаты комплексного изучения донных отложений оз. Шира, Минусинская котловина // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 292-297. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-292](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-292)

1. Введение

Донные отложения оз. Шира признаны ценнейшим архивом голоценовых природно-климатических изменений благодаря наличию в его осадках годично-слоистых серий – варв (Kalugin et al., 2013), что позволяет получать реконструкции природной среды с разрешением в сезон-десятилетия. Предлагаемая новая палинологическая запись из верхней части ядра Shira-2021-II-1 оказалась на 530 лет древнее предыдущей (Hildebrandt et al., 2015), позволив реконструировать историю природной среды за последние 2980 лет.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bezrukova@igc.irk.ru (Е.В. Безрукова)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

2. Материалы и методы

Бессточное, меромиктическое, соленое оз. Шира расположено в Хакасском государственном природном заповеднике. Площадь поверхности озера составляет 36 км², максимальная глубина воды ~ 25 м. Питание озера осуществляется через р. Сон. Другими источниками воды служат подземные воды и атмосферные осадки (Kalugin et al., 2013). Климат района континентальный, засушливый. В растительности севера Минусинской котловины преобладают степи и лесостепи. Предгорья заняты лесами из лиственницы *Larix sibirica* и, в меньшей

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



мере, из сосны *Pinus sylvestris*. Леса из березы *Betula*, сосны, ели *Picea obovata*, пихты *Abies sibirica*, кедра сибирского *Pinus sibirica* формируют горно-таежный пояс хребтов вокруг котловины. Вблизи оз. Ши́ра преобладают лугово-степные ассоциации с господством злаковых Poaceae, бобовых Fabaceae, сложноцветных Asteraceae, полыни *Artemisia*. По берегам растет лиственница, береза, тополь *Populus*, сосна, вяз *Ulmus pumila*, ивы *Salix*.

В 2021 году в самой глубокой части озера буровой станцией UWITEC была пробурена скважина, вскрывающая полную мощность разреза донных отложений, с отбором кернa ненарушенной структуры. К настоящему времени изучена верхняя, 144-сантиметровая часть разреза отложений из скважины Shira-2021-II-1. Модель возраст-глубина основана на результатах ^{14}C датирования с ускорительной масс-спектрометрией. Для палинологического, рентгено-флуоресцентного анализов, определения физических свойств проанализирован каждый сантиметр отложений. На пыльцевых слайдах проведен подсчет клеток зеленых водорослей, микрочастиц углей крупнее 100 мкм.

3. Результаты и обсуждение

Отложения в керне Shira-2021-II-1 формировались в последние 2980 лет и представлены чередованием разноцветных толщ, внутри которых прослеживается тонко-ламинированная слоистость. В составе отложений преобладает глинистая фракция. Реконструкции предполагают развитие на равнинах севера Минусинской котловины полынно-злаково-разнотравных лугово-степных группировок, на вершинах сопok - лиственницы в континентальном и недостаточно влажном климате котловины 2980-2650 л.н., что поддерживается и низкими значениями *Artemisia/Chenopodiaceae* (A/Ch). Повышенные значения биомы прохладных хвойных лесов свидетельствуют о более влажных условиях в горном обрамлении котловины, что соответствует влажному и прохладному климату Саяно-Алтайского региона 3000-2300 л.н. (Bronnikova et al., 2018). Важно отметить, что 2950-2750 л.н. в озере накапливались бедные органическим веществом «белесые» илы, характерные для интервалов голомиктического состояния озерной системы и пониженного уровня воды (Kalugin et al., 2013). Вероятно, более холодный климат и мог способствовать пониженному испарению /повышенному увлажнению и возникновению в горах благоприятных условий для темнохвойных древесных в горах.

Позднее, 2650-880 л.н., на севере Минусинской котловины возросла роль лугово-степных группировок. В горном окружении котловины сократилось участие темнохвойных древесных или повысилась их нижняя граница. Реконструкции предполагают континентальный, недостаточно влажный региональный климат, который, однако, прерывался короткими эпизодами повышенного увлажнения, о чем свидетельствуют максимумы значений A/Ch 2040, 1980 и 1850 л.н. Слой «белесых» илов, соот-

ветствующий похолоданию, формировался 2090-1950 л.н. Похолодание приводило к пониженному испарению, обеспечивая достаточное увлажнение для лугово-степных сообществ и биомы холодных листопадных лесов в интервале 2650-880 л.н.

Разнотравно-полынно-злаковые степи продолжали преобладать в интервале 880-70 л.н. Начиная со 120-100 лет назад по берегам озера появились влажные обитания, благоприятные для тополя, осоковых, лютиковых, возможно, свидетельствуя о расширении прибрежной/мелководной зоны. Повышенное значение пыльцы злаков (в т.ч., культурных) может отражать или их участие в растительности котловины и /или также расширение литорали, где и в настоящее время злаковые (тростники) также обильны.

Усиление роли березы в последние 50 лет совпадает по времени с аналогичным событием из записи LS09, подтверждая надежность возрастных моделей обеих записей и их высокое временное разрешение. Распространение березы могло быть следствием преобразования местных ландшафтов из-за строительства курортных зон вокруг оз. Ши́ра (Hildebrandt et al., 2015). Резко возросшее поступление в озеро частиц песчаной и иловой размерности в последние 50 лет также может быть следствием возросшей, антропогенно-обусловленной эрозии наряду с активным золовым привносом.

Сравнение вариаций в притоке макрочастиц углей в записи Shira-2021-II-1 с последовательностью культур бронзового и железного веков (Blyakharchuk and Chernova, 2013) в Хакасии демонстрирует повышенный приток углей в финале тагарской, середине таштыкской, первой половине развития киргизской культуры и на современный период. Причем для последних 50-40 лет характерно постоянно высокое поступление угольков в отложения оз. Ши́ра.

Сравнение вариаций A/Ch с вариациями температуры воздуха в Северной Атлантике показывает, что на протяжении последних 2980 лет почти каждому пику A/Ch соответствует пик в изотопно-кислородной записи NGRIP из Гренландии. Это может означать, что условия увлажнения для растительности на севере Минусинской котловины отражают декадную изменчивость температуры в Северной Атлантике.

4. Заключение

Таким образом, новая палинологическая запись из кернa Shira-2021-II-1 позволила реконструировать историю природной среды севера Минусинской котловины за последние 2980 лет с уникальным средним временным разрешением в 21 год. Реконструкции показывают существование относительно влажного регионального климата 2980-2650 л.н. и более аридного субрегионального в котловине. Вариации индекса A/Ch предполагают небольшое повышение увлажнения в котловине 2980 – 50 л.н. и его заметное снижение в последние 50 лет. Однако, это повышение прерывалось

кратковременными интервалами усиления аридизации климата. Максимальное поступление макрочастиц углей за последние 2980 лет приходится на существование такштыкской, киргизской культур и российский период, но были ли оно обусловлено только антропогенным влиянием, на данном этапе исследований определить трудно.

Реконструкции показали, что изменения растительности вокруг озера Шира в позднем голоцене были обусловлены, главным образом, крупномасштабными циркуляционными процессами, менявшими баланс влаги в регионе. В новой пыльцевой записи также, как и в предыдущей, не найдено четких пыльцевых показателей антропогенного влияния на растительность. Только заметное повышение содержания пыльцы березы в последние примерно 50 лет может указывать на проведение озеленения вокруг курортных зон.

Благодарности

Авторы благодарят Е.В. Кербера за работу с возрастной моделью.

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-17-00067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

Blyakharchuk T.A., Chernova N.A. 2013. Vegetation and climate in the Western Sayan Mts according to pollen data from Lugovoe Mire as a background for prehistoric cultural change in southern Middle Siberia. *Quaternary Science Reviews* 75: 22-42. DOI: [10.1016/j.quascirev.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.05.017)

Bronnikova M.A., Konopliankova Y.V., Agatova A.R. et al. 2018. Holocene Environmental Change In South-East Altai Evidenced By Soil Record. *Geography, Environment, Sustainability* 11: 100-111. DOI: [10.24057/2071-9388-2018-11-4-100-111](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2018-11-4-100-111).

Hildebrandt S., Müller S., Kalugin I.A. et al. 2015. Tracing the North Atlantic decadal-scale climate variability in a late Holocene pollen record from southern Siberia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 426: 75-84. DOI: [10.1016/j.palaeo.2015.02.037](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.037)

Kalugin I., Darin A., Rogozin D. et al. 2013. Seasonal and centennial cycles of carbonate mineralisation during the past 2500 years from varved sediment in Lake Shira, South Siberia. *Quaternary International* 290-291: 245-252. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.09.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.09.016)

Holocene vegetation history of the Western Caucasus inferred from high-resolution pollen record from Lake Khuko

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Chepurnaya A.A.¹, Novenko E.Y.²

¹Lomonosov Moscow State University, Vorobievsky Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

²Institute of Geography RAS, Staromonetny per., 29/4, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The paper presents the new paleoecological evidence for the last 10,000 years based on high resolution pollen record supported by detail radiocarbon dating, obtained from the Khuko Lake (Western Caucasus). The obtained results showed that change of vegetation corresponding main Holocene stages. 10368-10577 – 8000-8200 cal. yr BP – Boreal period was characterized in this region by the presence of both broad-leaved (*Fagus*, *Ulmus*) and coniferous (*Abies*) species to an equal. 8000-4400 cal. yr BP – Atlantic period was marked by predominance of broad-leaved forests have been formed mainly by beech and a little hornbeam. 4400-2600 cal. yr BP – Subboreal period is characterized by an increase in the role of boreal vegetation (*Abies*, *Pinus*). 2600 cal. yr BP up now – Subatlantic period looked like Atlantic period, but at this time declined value of coniferous species and grew value of alder and hazel.

Keywords: Caucasus, palynology, Holocene, vegetation history

For citation: Chepurnaya A.A., Novenko E.Y. Holocene vegetation history of the Western Caucasus inferred from high-resolution pollen record from Lake Khuko // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 298-303. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-298

1. Introduction

The present study is focused on the mid-altitude Khuko Lake located in Western Caucasus. The studies of mountain lakes in the Western Caucasus began by research group from the Institute of Geography of Russian Academy of Science about ten years ago exploring Karakel and Donguz-Orun lakes (Solomina et al., 2014; Chepurnaya, 2014).

Our study provides new paleoecological evidence for the last 10000 years based on high resolution pollen record supported by detail radiocarbon dating, obtained from the Khuko Lake.

2. Materials and methods

Lake Khuko (43°56'N; 39°48'E), presumably of tectonic origin (Efremov, 1991), is situated in the Western Caucasus on the border of the Republic of Adygea and the Krasnodar Territory. It is located at an altitude of 1744 m a.s.l. in the K.G.Shaposhnikov Caucasus State Natural Biosphere Reserve protected area within the southern slope of the Main Caucasus Range in its western part, 10 km northwest of Mt. Fisht

(Efremov, 1991). The lake is ~260 m long and ~150 m wide. No rivers flow in or out of the lake, except for one small creek draining the lake from the west side.

High-altitude forest belt (1600–2000 (2300) m a.s.l.) where the lake is located has been formed by *Fagus* forests with *Abies nordmanniana* and *Acer trautvetteri* as an admixture. And its uppermost part is often formed by *Pinus sylvestris*, *P.hamata*, *Abies nordmanniana*, and *Picea orientalis*.

The obtained sediment core was 196 cm long. The sampling interval for pollen analysis was 1 cm. Seven radiocarbon dates were obtained for the sediment core from the lake. Sample preparation for subsequent ¹⁴C analysis using accelerator mass spectrometry (AMS) for age determination of the sediment was performed at the Common Use Center “Radiocarbon Dating and Electron Microscopy Laboratory” of the Institute of Geography RAS. The IntCal13 calibration curve was used to determine the calendar age (Reimer et al., 2020). Throughout when the notion “ka BP” is used, calibrated age is implied.

Samples for pollen analysis (1 cm³) were prepared following modified method by Grichuk and Zaklinskaya (1948). Calculation of pollen percentages was based

*Corresponding author.

E-mail address: a_che@bk.ru (A.A. Chepurnaya)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



on the total terrestrial pollen sum, i.e. arboreal pollen (AP) plus non-arboreal pollen (NAP) without aquatic plants and spores. A minimum of 500 pollen grains per sample were counted (AP + NAP). Pollen diagram was constructed using the programs Tilia and TGView.

3. Results and discussion

Radiocarbon dating of the basal sample of the core showed that accumulation began in the early Holocene. (Grachev et al., 2020).

The pollen diagram for Khuko Lake (Fig.1) was divided into 7 local pollen assemblage zones (LPAZ), corresponding to the main phases of vegetation development.

LPAZ1 (200-177 cm) Pollen assemblages are characterized by a high AP content (up to 90%). There are peaks pollen curves of *Corylus* (up to 40%) and *Ulmus* (up to 15%) in the zone. *Carpinus* and *Fagus* pollen also dominate. NAP content is mainly represented by *Poaceae*, *Asteraceae* and *Chenopodiaceae* pollen. According to pollen data vegetation was presented beech forests with hornbeam admixture and hazel underbrush.

LPAZ2 (177-150 cm) AP decrease to 75-80%. The peak of *Fagus* pollen (up to 40%) determined the identification of the zone. Also, high pollen values of *Carpinus* -10-15%. *Abies* pollen increase from 5% to 20%. *Alnus* pollen value grow to 50% while *Corylus* pollen is halved. There was expansion of broad-leaved forests with beech and hornbeam to the higher hypsometric level.

LPAZ3 (150-115 cm) The zone is marked by NAP growth to 40% while AP continue to decline (to 60%). The composition of herbs is dominated by *Poaceae* (10%), *Asteraceae* (15%) and *Fabaceae* (10%) AP is characterized by high values of *Fagus* (20%), *Carpinus* (15%) and *Abies* (15%) pollen. High NAP content suggested open spaces appeared which was occurred by meadow and steppe species of vegetation. Forest composition remain unchanged.

LPAZ4 (115-72 cm) The ratio of AP-NAP-Spores groups shifts towards the growth of tree pollen (up to 70-752%) and spores (up to 10%). Assemblages are characterized by noticeable peak of *Pinus* (up to 20%) while other taxa remain unchanged. The main difference of this phase was the increase of boreal vegetation in the forest composition.

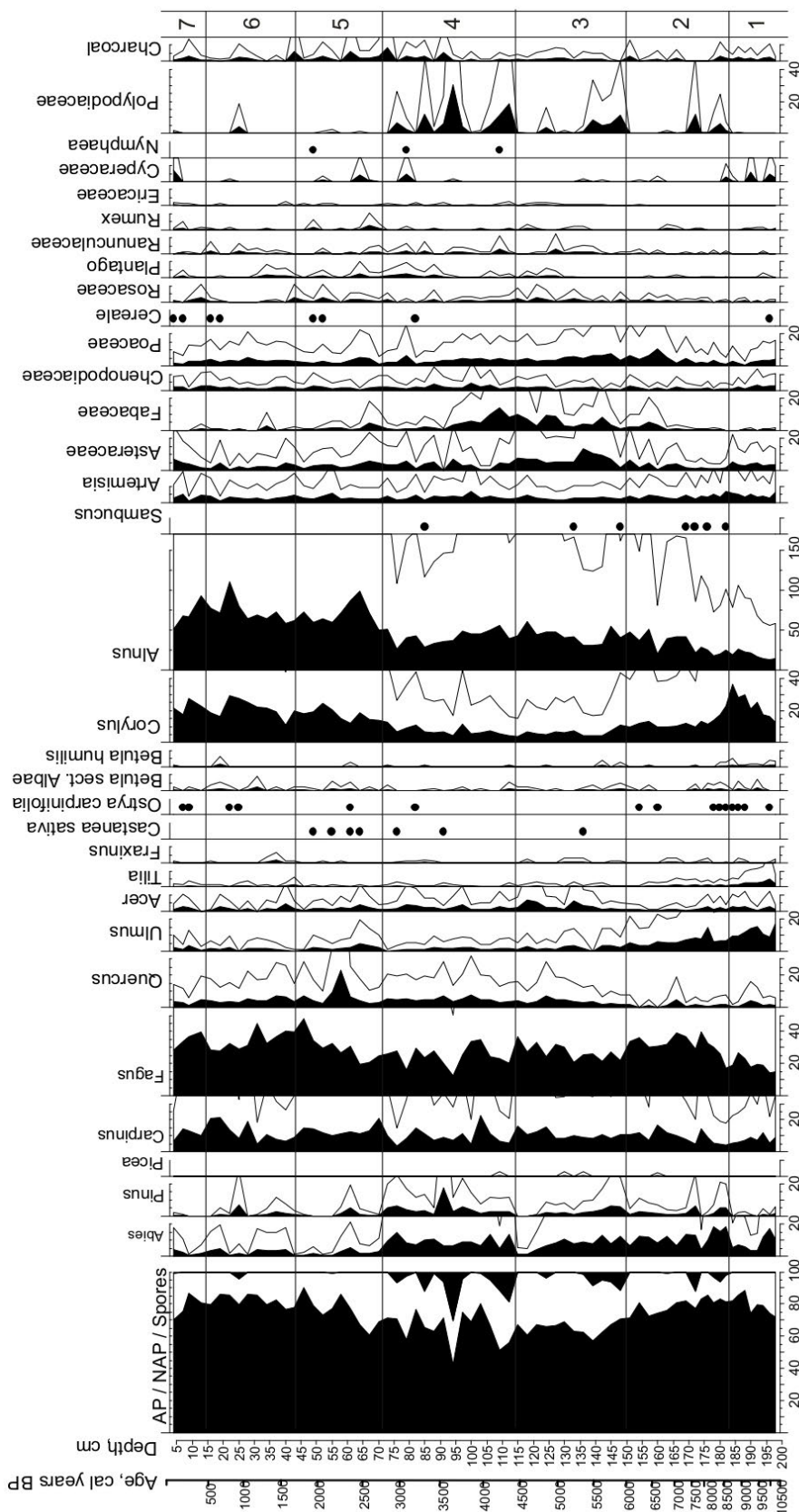


Fig.1. Pollen diagram of Khuko Lake deposits (AP + NAP = 100%)

LPAZ5 (72-44 cm) AP - 75-80%, NAP - 20-25%, Spores decline to 1%. Pollen values of broad-leave species increase: *Fagus* – up to 45%, *Carpinus* – up to 20%. There is peak of oak pollen value (up to 20%) here.

LPAZ6 (44-15 cm) AP content reached 85-90%, NAP decline to 10-15%, Spores = 2%. A high peak of *Alnus* (100% from AP + NAP sum) occurs at the depth of 25 cm. Increase of *Corylus* (up to 30%) accompanied by growth of *Carpinus* (20%), Pollen values of *Fagus* is the same as in previous zone.

LPAZ7 (15-0 cm) AP - 80-85%, NAP - 10-15%, Spores - 1%. Increase of *Alnus* (110% from AP + NAP sum) accompanied by growth of *Corylus* (30%). Pollen values of *Fagus* decrease a little (down to 40%). *Abies* value vary from 2% to 10%.

Vegetation of **LPAZ5, 6 and 7** was characterized by expansion of the broad-leaved species. Forest belt was formed by oak, beech and hornbeam. Area of coniferous forests belt decreased.

4. Conclusions

Palynological analysis and radiocarbon dating of Lake Khuko sediments allow us to discussed vegetation dynamics of the Western Caucasus during a few stages of Holocene 10,368-10,577 – 8000-8200 cal, yr BP – Boreal period was characterized in this region by the presence of both broad-leaved (*Fagus*, *Ulmus*) and coniferous (*Abies*) species to an equal. 8000-4400 cal. yr BP – Atlantic period was marked by predominance of broad-leaved forests have been formed mainly by beech and a little hornbeam. 4400-2600 cal. yr BP – Subboreal period - increase boreal vegetation (*Abies*, *Pinus*), 2600- cal. yr BP up to now – Subatlantic period looked like Atlantic, but at this time declined value of coniferous species and grew value of alder and hazel.

Acknowledgements

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Chepurnaya A.A. 2014. Dynamics of Vegetation Cover in the Late Holocene in Lake Karakel – Teberda Valley Area (According to Palynological Data). *Bull. Russ. Acad. Sci.* 2; 84–95. (in Russian)
- Efremov Y.V. 1991. In the Country of Mountain Lakes. Krasnodar: Krasnodarskoye knizhnoye izdatel'stvo, 215 pp. (In Russian)
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A. et al. 2020. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko. *The Holocene* 31: 368–379. DOI: [10.1177/0959683620972782](https://doi.org/10.1177/0959683620972782)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Fossil pollen and spore analysis and its implementation in paleogeography. OGIZ, Moscow. (in Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)
- Solomina, O. N., Kalugin, I. A., Darin, A. V. et al. 2014. The implementation of geochemical and palynological analyses of the sediment core of Lake Karakol for reconstructions of climatic changes in the valley of Teberda River (Northern Caucasus) during the Late Holocene: possibilities and restrictions. *Voprosy geografii [Request of Geography]* 137: 234-266. (in Russian)

История растительности Западного Кавказа по палинологическим данным высокого разрешения озера Хуко

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЧепурная А.А.¹, Новенко Е.Ю.²¹МГУ имени М. В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991, Россия²Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены новые данные по истории растительности за последние 10000 лет, основанные на пыльцевых материалах высокого разрешения, подтвержденных детальным радиоуглеродным датированием отложений озера Хуко (Западный Кавказ). Полученные результаты показали, что смена растительности соответствует основным этапам голоцена. 10368-10577 – 8000-8200 кал л.н. – Бореальный период характеризовался в этом регионе присутствием в равной степени как широколиственных (*Fagus*, *Ulmus*), так и хвойных (*Abies*) пород. 8000-4400 кал. л.н. – Атлантический период ознаменовалась преобладанием широколиственных лесов, образованных преимущественно буком и в меньшей степени грабом. 4400-2600 кал BP – Суббореальный период характеризовался увеличением бореальной растительности (*Abies*, *Pinus*), 2600-0 кал. л.н. – Субатлантический период в целом схож с Атлантическим по содержанию неморальной флоры, но в это время снизилась доля хвойных пород (пихты, сосны, ели) и выросла доля ольхи и орешника.

Ключевые слова: палинология, Кавказ, голоцен, история растительности

Для цитирования: Чепурная А.А., Новенко Е.Ю. История растительности Западного Кавказа по палинологическим данным высокого разрешения озера Хуко // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 298-303. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-298

1. Введение

Настоящее исследование посвящено изучению отложений среднегорного озера Хуко, расположенного на Западном Кавказе. Исследования горных озер Западного Кавказа начались научной группой Института географии РАН около десяти лет назад с изучения озер Каракель и Донгуз-Орун (Соломина и др., 2014; Чепурная, 2014). Здесь представлены новые палеоэкологические данные, основанные на палинологическом анализе отложений озера Хуко, подтвержденные детальным радиоуглеродным датированием.

2. Материалы и методы

Озеро Хуко (43°56' с.ш.; 39°48' в.д.), предположительно тектонического происхождения (Ефремов, 1991), расположено на Западном Кавказе на границе Республики Адыгея и Краснодарского края. Оно расположено на высоте 1744 м над уровнем моря, на территории Кавказского государствен-

ного природного биосферного заповедника имени К.Г. Шапошникова в пределах южного макросклона Главного Кавказского хребта в его западной части, в 10 км к северо-западу от горы Фишт (Ефремов, 1991). Озеро имеет длину ~260 м и ширину ~150 м. Озеро не имеет связи с речной сетью территории, за исключением одного небольшого ручья, впадающего в него с западной стороны.

Высотный лесной пояс (1600–2000 (2300) м над уровнем моря), в котором расположено озеро, образован буковыми лесами с примесью *Abies nordmanniana* и *Acer trautvetteri*. А выше формируются леса из *Pinus sylvestris*, *P. hamata*, *Abies nordmanniana* и *Picea orientalis*.

Полученный из отложений озера керн имеет длину 196 см. Интервал отбора проб для пыльцевого анализа составлял 1 см.

Из отложений озера получено семь радиоуглеродных дат. Подготовку проб для последующего анализа ¹⁴C с использованием ускорительной масс-спектрометрии (УМС) для определения возраста осадков проводили в ЦКП «Лаборатория ради-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: a_che@bk.ru (А.А. Чепурная)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



оуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН. Для определения календарного возраста использовали калибровочную кривую IntCal13 (Reimer et al., 2020). Когда используется понятие «ка ВР», подразумевается калиброванный возраст.

Пробы для пыльцевого анализа (1 см³) готовили по модифицированному методу Гричука и Заклинской (1948). Процентное содержание каждого таксона равно его доле по отношению к сумме всех групп растительности и спор, за исключением ольхи, которая из-за высокого обилия была выведена в отдельную группу. Подсчитывали минимум 500 пыльцевых зерен в образце (AP + NAP). Диаграмма пыльцы была построена с помощью программ Tilia и TGView.

3. Результаты и обсуждение

Радиоуглеродное датирование базального образца ядра показало, что накопление началось в раннем голоцене. (Grachev et al., 2020). Пыльцевая диаграмма озера Хуко (Рис. 1) была разделена на 7 пыльцевых зон (LPAZ), соответствующих основным фазам развития растительности.

LPAZ1 (200-177 см). Пыльцевые комплексы характеризуются высокой долей древесной растительности (до 90%). Пыльцевая зона была выделена по пикам кривых *Corylus* (до 40%) и *Ulmus* (до 15%). Также здесь отмечается высокое содержание пыльцы *Carpinus* и *Fagus*. Согласно пыльцевым данным, растительность была представлена буковыми лесами с примесью граба и орешником на незалесенных пространствах.

LPAZ2 (177-150 см) AP компонент пыльцевого спектра снижается до 75-80%. Зона выделена на основании высокого содержания пыльцы *Fagus* (до 40%) и *Carpinus* -10-15%. Количество пыльцы *Abies* увеличивается с 5% до 20%. Доля пыльцы ольхи увеличивается до 50%, а орешника снижается вдвое по сравнению с предыдущей зоной. В это время происходит экспансия грабовых и буковых широколиственных лесов на более высокие гипсометрические уровни.

LPAZ3 (150-115 см) Содержание NAP возрастает до 40% при продолжающемся снижении AP (до 60%). В составе трав преобладают *Poaceae*

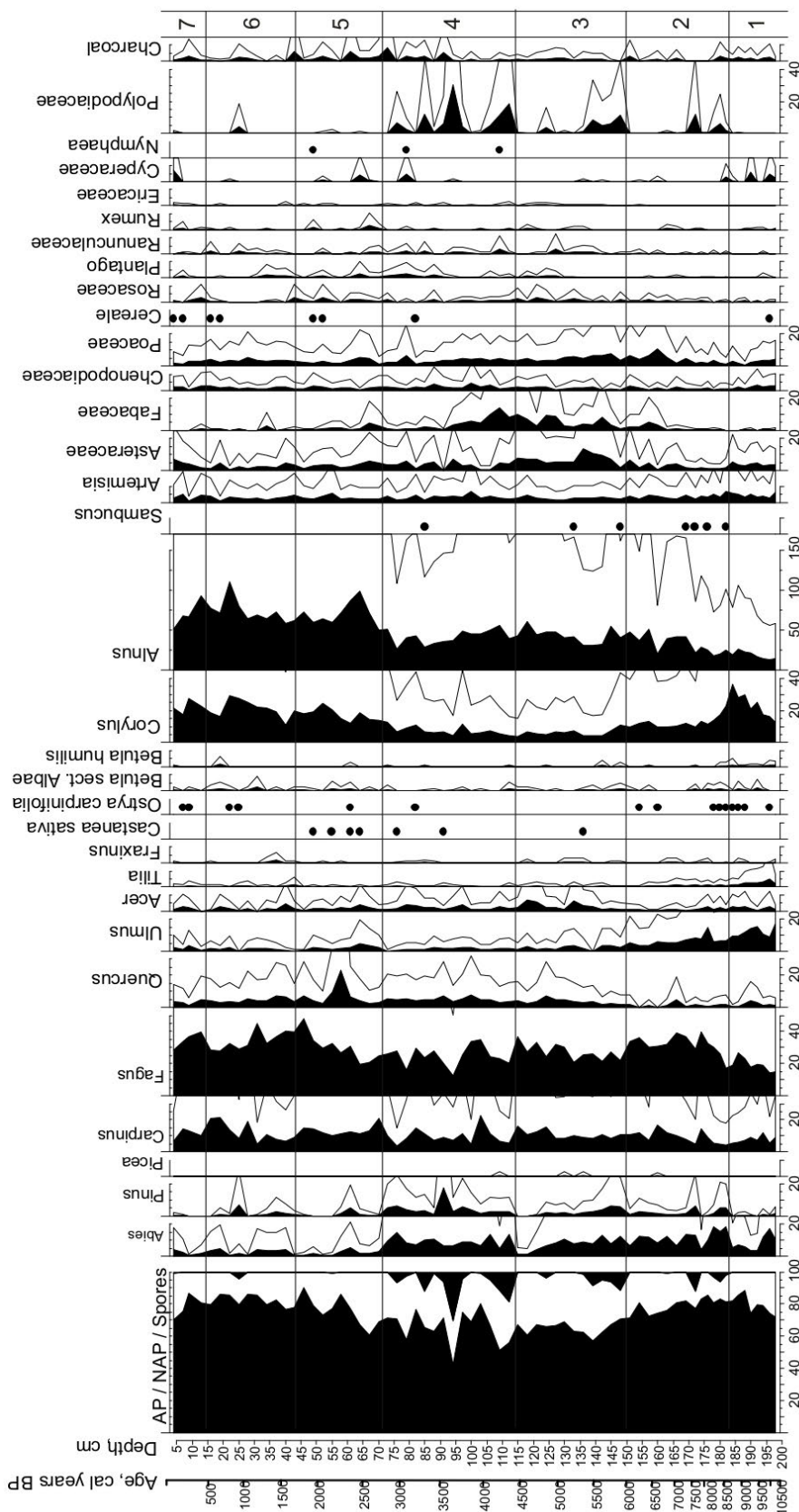


Рис.1. Спорово-пыльцевая диаграмма отложений оз.Хуко (Западный Кавказ)

(10%), Asteraceae (15%) и *Fabaceae* (10%). Среди пыльцы древесных наиболее высока доля *Fagus* (20%), *Carpinus* (15%) и *Abies* (15%). Высокое содержание NAP свидетельствовало о появлении открытых пространств, заселенных луговыми и степными видами растительности.

LPAZ4 (115-72 см) Соотношение групп AP-NAP-Spores смещается в сторону роста пыльцы деревьев (до 70-75%) и спор (до 10%). Для комплексов характерен заметный пик содержания *Pinus* (до 20%) при сохранении доли остальных таксонов. Главным отличием этой фазы было возрастание доли бореальной растительности в составе лесов.

LPAZ5 (72-44 см), AP - 75-80%, NAP - 20-25%, Доля спор снижается до 1%. Увеличивается доля пыльцы широколистных видов: *Fagus* – до 45%, *Carpinus* – до 20%. Здесь наблюдается пик содержания пыльцы дуба (до 20%).

LPAZ6 (44-15 см) Доля пыльцы деревьев достигает 85-90%, а трав - снижается до 10-15%. Одновременно возрастают доли ольхи, орешника (до 30%) и граба (20%),

LPAZ6 (15-0 см), AP - 80-85%, NAP - 10-15%, Споры - 1%. Продолжается рост содержания ольхи и лещины. Несколько снижаются доля пыльцы бука (до 40%). Доля *Abies* меняется в пределах от 2% до 10%.

Растительность 5, 6 и 7 пыльцевых зон характеризовалась экспансией широколиственных видов, среди которых преобладают буковые, грабовые и дубовые формации. Уменьшилась площадь пояса хвойных лесов.

4. Выводы

Палинологический анализ и радиоуглеродное датирование отложений озера Хуко позволяют говорить о динамике растительности Западного Кавказа на протяжении нескольких этапов голоцена. 10368-10577 – 8000-8200 cal BP - бореальный период характеризовался в этом регионе присутствием в равной степени как широколиственных (*Fagus*, *Ulmus*), так и хвойных (*Abies*) пород. (8000-4400 cal BP – Атлантический период ознаменовалась преобладанием широколиствен-

ных лесов, образованных преимущественно буком и, в меньшей степени, грабом. 4400-2600 cal BP – Суббореальный – увеличением доли бореальной растительности (*Abies*, *Pinus*) в составе лесов, 2600-0 кал. л.н. – Субатлантический период в целом схож с Атлантическим по содержанию неморальной флоры, но в это время снизилась доля хвойных пород (пихты, сосны, ели) и выросла доля ольхи и орешника.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024)

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Ефремов Ю.В. 1991. В стране горных озер. Краснодар. Краснодарское книжное издательство. 215 с.
- Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: Географгиз, 224 с.
- Соломина О.Н., Калугин И.А., Дарьин А.В. и др. 2014. Использование геохимического и пыльцевого анализов отложений оз. Каракель для реконструкции климатических изменений в долине р. Теберда (Северный Кавказ) в позднем голоцене. Вопросы географии 137: 234-266.
- Чепурная А.А. 2014. Динамика растительного покрова в позднем голоцене в районе оз. Каракель–долина р. Теберды (по палинологическим данным). Известия РАН. Серия географическая 2: 84-95.
- Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A. et al. 2020. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko. The Holocene 31: 368–379. DOI: [10.1177/0959683620972782](https://doi.org/10.1177/0959683620972782)
- Reimer P.J., Austin W.E., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). Radiocarbon 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)

Environmental conditions of the maximum phase of the Last Glaciation: reconstruction based on the studies of sediments of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Borisova O.K. *, Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L.

Institute of Geography RAS, 29 building 4 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The paper discusses new palynological data obtained from the bottom sediments of Lake Chukhlomskoye (Kostroma region). The location of the lake beyond the limits of the Late Valdaian ice sheet made it possible to reconstruct the vegetation changes during the maximum phase of the glaciation and compare them with previously obtained data from sediments of Lake Galichskoye. 25-21 thousand calibrated years BP, the region was occupied by open periglacial steppe with limited participation of birch and spruce open forests in the most protected habitats, with continuous spread of permafrost. Climatic reconstructions based on the modern geographical analogue of the fossil pollen flora indicate that mean annual temperature in the region was about -4°C (7°C below modern), and annual precipitation was at near-present level.

Keywords: lake deposits, pollen analysis, vegetation and climate reconstructions, Last Glacial Maximum

For citation: Borisova O.K., Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. Environmental conditions of the maximum phase of the Last Glaciation: reconstruction based on the studies of sediments of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 304-309. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-304

1. Introduction

Lake Chukhlomskoye is situated on the Galich-Chukhloma Upland with elevations ranging from 150.0 to 293 m above sea level, within the southern taiga zone with a temperate continental climate. It is the second largest lake in the Kostroma region, following Lake Galichskoye, with a water surface area of approximately 49 km² and a drainage area of ~270 km². Both Galichskoye and Chukhlomskoye lakes are located outside the boundaries of the Last (Late Valdaian) Glaciation (Map of Quaternary..., 1972). Therefore, the sedimentation process in these lakes has been continuous throughout the last glacial epoch. Comprehensive analyses of the lake sediments offer a valuable opportunity to reconstruct the vegetation and climatic dynamics during the Last Glacial Maximum (LGM). These reconstructions can be reliably correlated with the timescale by radiocarbon dating, thus enabling a more accurate understanding of past environmental changes.

2. Materials and methods

Borehole Chu13a was drilled in the deepest central part of Lake Chukhlomskoye, at a depth of 4.0 m (Filippova et al., 2023). With the upper weakly consolidated layer of silt, the thickness of the collected core was 745 cm. Eight 14C AMS dates on total organic carbon were obtained on this core at the Center for Collective Use "Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy" of the Institute of Geography RAS and at the Center for Isotope Research of the University of Georgia (USA) and calibrated using the OxCal20 calibration curve (Reimer et al., 2020). The most ancient date from the base of the section (IGANams-9358) is 21110 ± 55 14C yr BP (25460 ± 110 cal BP) (Filippova et al., 2022). The series of calibrated dates made it possible to develop an age-depth model for the Chu-13a section.

For pollen extraction from sediments, separation with heavy liquid with a density of $2.25\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ was

*Corresponding author.

E-mail address: olgakborisova@gmail.com (O.K. Borisova)

Received: June 08, 2024; Accepted: July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



used (Grichuk and Zaklinskaya, 1948), with the propionic anhydride and concentrated sulfuric acid applied for acetolysis (Mazei and Novenko, 2021). Statistical processing of palynological data and construction of diagrams were carried out using the TILIA and TILIA*GRAPH software (Grimm, 1990).

3. Results and discussion

In Lake Chukhlomskoye, laminated grey silt with a median particle size of $\sim 16 \mu\text{m}$ accumulated during the maximum phase of the last glaciation (Filippova et al., 2023). In this layer, the contents of organic matter and carbonates in the sediments do not exceed 5% and 8-10%, respectively (Filippova et al., 2023). The depth-age model shows that from 25 to 21 thousand cal BP a stable accumulation took place at average rate of $0.7\text{-}0.8 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$. The detailed palynological record from the Chu-13a core enables a reconstruction of flora and vegetation changes in the Lake Chukhlomskoye area during this time interval with a temporal resolution of about 150 years.

Pollen assemblages from the Chu-13a core, dating to the maximum (coldest) stage of the Last Glaciation, are relatively uniform. Pollen of trees and shrubs is 25-35% of the total pollen sum of terrestrial plants Σ . Tree pollen belongs mainly to hardy species, such as *Picea*, *Betula* sect. *Albae* and *Pinus sylvestris*. The proportion of pollen from each of these species does not exceed 6-8% of the spectra. Pollen from trees, currently associated with colder and more continental climates, such as *Abies*, *Larix*, and *Pinus sibirica*, is constantly present in small quantities ($<1\%$). The composition of the spectra is dominated by pollen of herbaceous plants, which ranges from 65 to 75% Σ . In the lower part of the profile, Poaceae pollen makes up 30-40%, *Artemisia* – 10-15%, Chenopodiaceae – up to 10% Σ . In its upper part, the share of *Artemisia* increases to 20-25% Σ , mainly due to a decrease in the share of Poaceae pollen. Palynological data point to the extreme richness of meadow and steppe vegetation during the maximum phase of the Last Glaciation: pollen of forbs from 20 families were identified within this interval, many of which are represented by several species, genera, or morphological types. The proportion of forb pollen slightly decreases up the section. These changes may indicate the transition from the cryohygrotyc phase of the Late Valdai glaciation to the cryoxerotic one corresponding to the maximum cooling (Grichuk, 1960).

The pollen flora found in the Chu-13a record includes species belonging to a wide range of ecological and phytocenotic groups: (1) microthermal mesophilous plants, e.g. shrub birches *Betula nana* and *B. humilis*, shrub alder *Alnaster fruticosus*, *Selaginella selaginoides* and *Botrychium boreale*; (2) mesophilous meadow forbs (*Sanguisorba*, *Thalictrum*, *Valeriana* and many others); (3) relatively cold-resistant xerophytes – inhabitants of modern dry steppes and semi-deserts (*Ephedra*, *Eurotia ceratoides*); (4) halophytes (Plumbaginaceae); (5) heliophytes (*Helianthemum*, *Bupleurum*); (6) bare/eroded ground plants (*Centaurea cyanus*, *Chenopodium album*, *Cannabis*, etc.); (7) a variety of hardy mire, lake-

shore and aquatic plants.

This high diversity of flora is consistent with data from other Late Valdai pollen records of the East European Plain (Grichuk, 1982). In particular, the composition of the pollen spectra and fossil flora of the LGM from the Chu-13a section is very close to the characteristics established earlier for the same time interval based on the study of bottom sediments of Lake Galichskoye (Velichko et al., 2001; Borisova et al., 2022). Analysis of the modern geographical distribution of species of fossil pollen flora from sediments of Lake Galichskoye, accumulated from 22 to 20 thousand cal BP, showed that the closest region-analogue for this flora is in Eastern Altai Mountains, at the upper reaches of the Abakan River, east of Lake Teletskoye (Borisova, 2021). This small area supports spruce, pine and larch mountain forests, subalpine meadows and shrub thickets, and relatively widespread open herbaceous communities, including xerophilous associations on steep southern slopes.

From the modern climatic conditions within this floristic region-analogue (so-called centre of present concentration of the fossil flora), we estimated the main climatic indexes for the maximum phase of the Last Glaciation in the Kostroma region. The reconstruction showed that the average temperature of the coldest month (January) during this period was $-19 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($6 \pm 3^\circ$ lower than today), with that of the warmest month (July) $11 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($7 \pm 3^\circ$ lower than today). With regard to the annual amount of precipitation, the uncertainty in the estimate is very high (500-800 mm) because of the mountainous terrain in the region-analogue. It is possible that mean annual precipitation at the LGM was at near-present level ($\sim 550 \text{ mm}$).

4. Conclusions

Composition of pollen assemblages and fossil floras from deposits of lakes Chukhlomskoye and Galichskoye reveal that during the maximum phase of the Last Glaciation the region was occupied by open periglacial steppe vegetation with small patches of birch and spruce open forests and individual groups of trees in the most protected habitats, along with diverse mire, meadow, and riverine communities. Climatic reconstructions based on the modern geographical analogue of the fossil pollen flora indicate that in the LGM mean annual temperature in the region was about $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, that is about $7 \text{ }^\circ\text{C}$ lower than that of today ($+3 \text{ }^\circ\text{C}$), which should have caused the continuous spread of permafrost. The annual temperature amplitude (an indicator of climate continentality) and the amount of precipitation were at near-present level.

5. Acknowledgments

The research was funded by the Russian Science Foundation project No. 23-77-10063.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Borisova O.K. 2021. Landscape and climatic conditions in the central East European Plain in the last 22 thousand years: reconstruction based on paleobotanical data. *Water Resources* 48(6): 886-896. DOI: [10.1134/S0097807821060038](https://doi.org/10.1134/S0097807821060038)
- Borisova O., Konstantinov E., Utkina A. et al. 2022. On the existence of a large proglacial lake in the Rostov-Kostroma lowland, north-central European Russia. *Journal of Quaternary Science* 37(8): 1442-1459. DOI: [10.1002/jqs.3454](https://doi.org/10.1002/jqs.3454)
- Filippova K.G., Konstantinov E.A., Borisova O.K. et al. 2022. Lake Chukhlomskoe in the Late Pleistocene and Holocene (Kostroma region, Russia). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1417-1420. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417)
- Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. et al. 2023. Structure and origin of the bottom relief of Lake Chukhlomskoe (Kostroma Region). *Geomorfologiya i Paleogeografiya* [Geomorphology and Paleogeography] 54(4): 145-162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047) (in Russian)
- Grichuk M.P. 1960. Common features in the natural history of the middle part of the Yenisei and Ob basins and their significance for the stratigraphy of Quaternary deposits. In: *Sbornik materialov po geologii Krasnoyarskogo kraya* [Collection of materials on the geology of the Krasnoyarsk Territory]. Moscow: GOSGEOLTEKHIZDAT, pp. 121-131. (in Russian)
- Grichuk V.P. 1982. Vegetation of Europe in Late Pleistocene. In: *Paleogeografiya Evropy za poslednie sto tysyach let* [Paleogeography of Europe during the Last One Hundred Thousand Years]. Moscow: Nauka, pp. 92-109. (in Russian)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analiz iskopayemykh pyl'tsy i spor i yego primeneniye v paleogeografii [Analysis of fossil pollen and spores and its application in palaeogeography]. Moscow: OGIZ. (in Russian)
- Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter 4: 5-7.
- Map of Quaternary deposits: O-38-VII. 1972. In: Borozdina Z.I. (Ed.), *Geological map of the USSR. Map of Quaternary deposits. Mezenskaya series. Scale: 1:200 000*. Moscow: Vsesoyuzny Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR. (in Russian)
- Mazei N.G., Novenko E.Yu. 2021. The use of propionic anhydride in the preparation of samples for pollen analysis. *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka* [Nature Conservation Research. Reserved Nature] 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036) (in Russian)
- Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)
- Velichko A.A., Kremenetski K.V., Negendank J. et al. 2001. Late Quaternary history of vegetation of the Kostroma Transvolga according to the data of the palynological study of bottom sediments of the Galich Lake. *Byulleten' Komissii po Izucheniyu Chetvertichnogo Perioda* [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period] 64: 5-20. (in Russian)

Природная обстановка максимальной фазы последнего оледенения: реконструкция по данным изучения осадков Чухломского и Галичского озер

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Борисова О.К.*, Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л.

Институт географии РАН, Старомонетный пер, д. 29, стр. 4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. Резюме. В статье рассмотрены новые палинологические данные, полученные по донным отложениям Чухломского озера (Костромская область). Озеро находится за пределами распространения поздневалдайского ледникового покрова, что позволило реконструировать изменения растительности в максимальную фазу оледенения и сравнить их с полученными ранее данными по отложениям Галичского озера. 25-21 тыс. лет назад регион был занят перигляциальными степями с ограниченным участием березовых и еловых редколесий в наиболее защищенных местообитаниях при непрерывном распространении вечной мерзлоты. Климатические реконструкции, основанные на определении современного географического аналога ископаемой пыльцевой флоры, показали, что среднегодовая температура в регионе составляла около -4°C , что на 7°C ниже современной), а годовое количество осадков было близким к современному.

Ключевые слова: озерные отложения, пыльцевой анализ, реконструкции растительности и климата, максимум последнего оледенения

Для цитирования: Борисова О.К., Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. Природная обстановка максимальной фазы последнего оледенения: реконструкция по данным изучения осадков Чухломского и Галичского озер // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 304-309. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-304

1. Введение

Озеро Чухломское расположено на Галичско-Чухломской возвышенности с высотами 150-293 м над ур. моря, в пределах зоны южной тайги с умеренно-континентальным климатом. Это второе по величине озеро в Костромской обл. после Галичского озера с площадью водного зеркала $\sim 49\text{ км}^2$ и площадью водосбора $\sim 270\text{ км}^2$. И Галичское, и Чухломское озера расположены за пределами последнего (поздневалдайского) оледенения (Карта четвертичных..., 1972), следовательно, процесс седиментации в этих озерах развивался непрерывно на протяжении всей последней ледниковой эпохи. Комплексный анализ озерных отложений позволяет восстановить динамику растительности и климата во время последнего ледникового максимума (Last Glacial Maximum – LGM). С помощью радиоуглеродного датирования эти реконструкции надежно привязаны к шкале времени, что способствует лучшему пониманию изменений окружающей среды в прошлом.

2. Материалы и методы

Скважина Chu13a пробурена в центральной части Чухломского озера на глубине 4.0 м. (Филиппова и др., 2023). С учетом верхнего слабо консолидированного слоя ила мощность отобранного керна составила 745 см. Для восьми образцов из колонки Chu13a методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США) был определен ^{14}C возраст по общему углероду. Калибровка ^{14}C дат выполнена с помощью программы OxCal20 (Reimer et al., 2020). Наиболее древняя датировка в основании разреза составила $21110 \pm 55\text{ }^{14}\text{C}$ л. н. (25460 ± 110 кал. л. н.) (IGANams-9358) (Filippova et al., 2022). Серия калиброванных дат позволила построить модель глубина-возраст для разреза Chu-13a.

Для выделения пыльцы из осадков применялась сепарация тяжелой жидкостью с плотностью

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: olgakborisova@gmail.com (О.К. Борисова)

Поступила: 08 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2.25 г·см⁻³ (Гричук и Заклинская, 1948); для ацетоллиза использованы пропионовый ангидрид и концентрированная серная кислота (Мазей и Новенко, 2021). Статистическая обработка палинологических данных и построение диаграмм проводились при помощи программ TILIA и TILIA*GRAPH (Grimm, 1990).

3. Результаты и обсуждение

В максимальную фазу последнего оледенения в Чухломском озере накапливался слоистый серый ил с медианным размером частиц ~16 мкм (Филиппова и др., 2023). Содержания органического вещества и карбонатов в этом слое не превышают 5% и 8-10%, соответственно (Филиппова и др., 2023). Глубинно-возрастная модель показывает, что с 25 до 21 тыс. кал. л. н. происходило устойчивое осадконакопление со средней скоростью 0.7-0.8 мм·год⁻¹. Подробные палинологические данные по колонке Chu-13а позволяют реконструировать изменения флоры и растительности в районе Чухломского озера за этот период с разрешением по времени около 150 лет.

Пыльцевые спектры осадков максимальной (наиболее холодной) стадии последнего оледенения в разрезе Chu-13а довольно однородны. Пыльца деревьев и кустарников составляет 25-35% от общей суммы пыльцы наземных растений Σ. Пыльца деревьев принадлежит в основном наиболее выносливым видам, таким как *Picea*, *Betula sect. Albae* и *Pinus sylvestris*. Доля пыльцы каждого из этих видов не превышает 6-8% спектров. Пыльца деревьев, распространенных в настоящее время в регионах с более холодным и континентальным климатом, таких как *Abies*, *Larix* и *Pinus sibirica*, постоянно присутствует в небольших количествах (<1%). В спектрах преобладает пыльца травянистых растений (65-75%). В нижней части профиля пыльца Poaceae составляет 30-40%, *Artemisia* – 10-15%, *Chenopodiaceae* – до 10% Σ. В верхней его части доля пыльцы полыни увеличивается до 20-25%, в основном за счет сокращения доли пыльцы злаков. Палинологические данные свидетельствуют о богатстве лугового и степного разнотравья в максимальную фазу оледенения: в этом интервале определена пыльца трав из 20 семейств, многие из которых представлены несколькими видами, родами или морфологическими типами пыльцы. Доля пыльцы разнотравья уменьшается вверх по разрезу, что может указывать на переход от криогигротической фазы поздневалдайского оледенения к его криоксеротической фазе, соответствующий максимальному похолоданию (Гричук, 1960).

Пыльцевая флора, обнаруженная в разрезе Chu-13а, включает виды, принадлежащие к различным эколого-фитоценотическим группам: 1 – микротермные мезофильные растения (кустарниковые березы *Betula nana* и *B. humilis*, ольховник *Alnaster fruticosus*, *Selaginella selaginoides* и *Botrychium boreale*); 2 – мезофильные луговые травы (*Sanguisorba*, *Thalictrum*, *Valeriana* и многие другие); 3 – отно-

сительно холодостойкие ксерофиты – обитатели современных сухих степей и полупустынь (*Ephedra*, *Eurotia ceratoides*); 4 – галофиты (*Plumbaginaceae*); 5 – гелиофиты (*Helianthemum*, *Vupleurum*); 6 – виды нарушенных грунтов (*Centaurea cyanus*, *Chenopodium album*, *Cannabis* и др.); 7 – разнообразные выносливые болотные, прибрежно-водные и водные растения.

Такое разнообразие флоры хорошо согласуется с имеющимися палинологическими данными по поздневалдайским отложениям Восточно-Европейской равнины (Гричук, 1982). В частности, состав пыльцевых спектров и ископаемой флоры LGM из разреза Chu-13а близок к характеристикам, установленным для того же временного интервала по донным осадкам Галичского озера (Величко и др., 2001; Borisova et al., 2022). Анализ современного географического распространения видов ископаемой пыльцевой флоры из отложений Галичского озера, накопившихся 22-20 тыс. кал. л. н., показал, что ближайший район-аналог для этой флоры находится на Алтае, в верховьях бассейна р. Абакан, к востоку Телецкого озера (Борисова, 2021). На этой территории соседствуют еловые, сосновые и лиственничные горные леса, субальпийские луга и заросли кустарников и довольно широко распространены открытые травянистые сообщества, в том числе ксерофильные ассоциации на крутых склонах южной экспозиции.

По современным климатическим условиям в пределах этого района-аналога (т. наз. центра современной концентрации ископаемой флоры) были реконструированы основные климатические показатели максимальной фазы последнего оледенения на территории Костромского региона: средняя температура наиболее холодного месяца (января) составила $-19 \pm 3^\circ\text{C}$, что на $6 \pm 3^\circ$ ниже современной, а средняя температура наиболее теплого месяца (июля) – $11 \pm 3^\circ\text{C}$ (на $7 \pm 3^\circ$ ниже современной). Неопределенность оценки годовой суммы осадков очень велика из-за гористого рельефа региона-аналога: 500-800 мм. Возможно, среднегодовое количество осадков в LGM было близким к современному (~550 мм).

4. Заключение

Состав пыльцевых комплексов и ископаемых флор в осадках Чухломского и Галичского озер показывает, что в максимальную фазу последнего оледенения регион был занят перигляциально-степной растительностью с небольшими участками березовых и еловых редколесий и отдельными группами деревьев в наиболее защищенных местообитаниях, а также разнообразными болотными, луговыми и речными сообществами. Климатические реконструкции на основе современного географического аналога ископаемой пыльцевой флоры показывают, что в LGM среднегодовая температура в регионе составляла около -4°C , т.е. была на 7°C ниже современной ($+3^\circ\text{C}$), что должно было вызвать непрерывное распространение вечной мерзлоты. Годовая

амплитуда температуры (показатель континентальности климата) и количество осадков были близки к современным.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-77-10063.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Борисова О.К. 2021. Ландшафтно-климатические условия в центральной части Восточно-Европейской равнины в последние 22 тысячи лет (реконструкция по палеоботаническим данным). *Водные ресурсы* 48(6): 664-675. DOI: [10.31857/S0321059621060031](https://doi.org/10.31857/S0321059621060031)

Borisova O., Konstantinov E., Utkina A. et al. 2022. On the existence of a large proglacial lake in the Rostov-Kostroma lowland, north-central European Russia. *Journal of Quaternary Science* 37(8): 1442-1459. DOI: [10.1002/jqs.3454](https://doi.org/10.1002/jqs.3454)

Filippova K.G., Konstantinov E.A., Borisova O.K. et al. 2022. Lake Chukhlomskoe in the Late Pleistocene and Holocene (Kostroma region, Russia). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1417-1420. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1417)

Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. 2023. Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область).

Геоморфология и палеогеография 54(4): 145-162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047)

Гричук М.П. 1960. Общие черты в истории природы средней части бассейнов Енисея и Оби и их значение для стратиграфии четвертичных отложений. В: Сборник материалов по геологии Красноярского края. М.: Госгеолтехиздат, С. 121-131.

Гричук В.П. 1982. Растительность Европы в позднем плейстоцене. В: Герасимов И.П., Величко А.А. (ред.), Палеогеография Европы за последние сто тысяч лет (Атлас-монография). Москва, С. 92-109.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: ОГИЗ ГЕОГРАФИЗ.

Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods. Newsletter 4: 5-7.

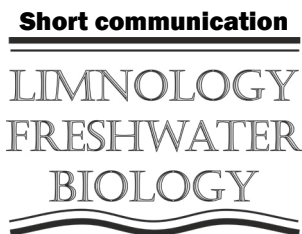
Карта четвертичных отложений: О-38-VII. 1972. В кн.: Бороздина З.И. (ред.). Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, масштаб: 1:200 000. Москва: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.

Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. 2021. Применение пропионового ангидрида при подготовке проб для спорово-пыльцевого анализа. *Nature Conservation Research. Заповедная наука* 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Reimer P., Austin W.E.N., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)

Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й. и др. 2001. Позднечетвертичная история растительности Костромского Заволжья по данным палинологического изучения донных осадков Галичского озера. *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода* 64: 5-20.

Transformation of local kettle holes based on geological and geophysical evidence, Borisoglebsk Upland, Central European Russia



Garankina E.V.^{1,2*}, Shorkunov I.G.¹, Yurchenko A.P.¹,
Posazhennikova V.S.^{1,2}, Lobkov V.A.¹

¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Lane, 29, Moscow, 119017, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. Late Pleistocene evolution of Central European glacial landscapes is often narrowed down to the impact of postglacial linear erosion. Yet extensive watersheds in the marginal zone of MIS6 glaciation were protractedly affected by the postglacial flattening in periglacial and interglacial conditions. Local sediment sinks such as kettle holes and dry valleys infilled throughout the postglacial stage can serve not only as records of paleoenvironmental changes but also for assessing the scales of watershed denudation and landscape transformation since the last glacial cover degradation. We attempted to use electrical resistivity tomography for paleogeomorphological survey of a local flat-bottomed depression previously studied by conventional lithological and stratigraphic approaches. The obtained geophysical profile showed a contrasting picture of the relatively higher-resistive glacial base embedded with low-resistive lenses 3-25 m thick at a top. The latter were correlated with the postglacial loamy deposits of colluvial and lacustrine origin that infilled the lows of initial glacial topography. It was revealed that the depression has a particularly complex inner structure embodying at least two buried kettle holes divided by a large glacial ridge almost buried under the postglacial infill. They functioned as separate basins during much of the Late Pleistocene and have probably merged only at its final stages. The geophysical cross-section also showed a quite variable bottom relief of each kettle with significantly steeper slopes than the modern sides of the depression. Thus, electrical resistivity tomography prospecting proved to be useful for detecting the postglacial loamy infills of initial lows of the MIS6 glacial topography and can be further employed to better understand the actual scales of the postglacial redeposition and landscape modeling during the last 150–130 ka.

Keywords: glacial landscapes, paleolakes, electrical resistivity tomography, facies analysis, lacustrine deposits, Late Pleistocene

For citation: Garankina E.V., Shorkunov I.G., Yurchenko A.P., Posazhennikova V.S., Lobkov V.A. Transformation of local kettle holes based on geological and geophysical evidence, Borisoglebsk Upland, Central European Russia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 310-317. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-310](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-310)

1. Introduction

Late Pleistocene evolution of Central European glacial landscapes is often narrowed down to the impact of postglacial linear erosion. However, extensive watersheds widespread in the marginal zone of MIS6 glaciation were protractedly affected by the postglacial flattening due to the redeposition of glacial load by slope, eolian, and other periglacial processes in local sediment traps, i.a. in lacustrine environments, and their additional infill due to the biogenic accumulation of peat, gyttja, or sapropel during the warmer climatic phases.

However, occasionally mentioned as characteristic of periglacial environments those agents are underestimated as actual drivers of landscape transformation (Garankina et al., 2019). The accurate assessment of such contribution is possible through studying the infill structure and volume of local sediment sinks. As facies and stratigraphical research of postglacial sedimentary sequences of kettle holes, larger glacial closed and semi-closed depressions, and lake basins are quite common there are only a few investigations of the geomorphology of initial lows (e.g., Karasiewicz et al., 2017; Forsytek et al., 2018; Woronko et al., 2018; Hosek et

*Corresponding author.

E-mail address: evgarankina@gmail.com (E.V. Garankina)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



al., 2019; Hein et al., 2021; Mirosław-Grabowska et al., 2021). That considerably constrains the potential of volumetric estimation of postglacial redeposition and accumulation in the region.

Geophysical prospecting is one useful approach for studying buried morphologies. As the area is dominated by pronounced loamy cover above glacial sands, loams, and diamicts, electrical resistivity tomography (ERT) (Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019, etc.) seems to be more effective than ground penetrating radar profiling yet much more affordable than seismic sounding (Hein et al., 2021). Thus, ERT was chosen as a tool for paleogeomorphological survey of a local flat-bottomed depression previously studied by conventional lithological and stratigraphic approaches (Garankina et al., 2023).

2. Materials and methods

Solovey Kettle is a local depression at the NE Borisoglebsk Upland about 190 km NE of Moscow and 10 km WSW of Rostov (Yaroslavl Oblast) (Fig. 1a). Last glaciated during the MIS6 (Astakhov et al., 2016), the region since has experienced alternations of interglacial (MIS5e, MIS1) and periglacial (MIS5d–MIS2) conditions. Glacial topography of the area is dominated by low-amplitude hilly plains alternating with pronounced hills and shallow depressions. The latter are mostly kettle holes filled with sediments reflected as gentle concavities ranging from 0.5 to 4 km in diameter. Solovey

kettle belongs to the Puzhbol Gully catchment lying beyond the upper reaches of its right tributary (Fig. 1b). From the north and west, the semi-round depression is canvassed by two large hills elevated 25–50 m while smaller knobs 5–7 m high are spread along its southern and eastern margins. The dry, slightly concave flat floor (1.0 km x 0.7 km) has semi-separated S and NE hollows. The southern hollow is slightly soggy, yet a distinct shallow waterbody persisted there until the land reclamation and construction of an artificial drainage system in 1984.

At the bottom and sides of the Solovey Kettle, 15 cores ranging in thickness from 4 to 21.5 m were acquired with an impact hand corer, mechanized rotary corer, and press-auger. The structure of the surrounding watersheds was explored in several quarry walls supplemented by a couple of pits on the shoulders and footslopes of hills. All geological exposures were photographed and provided with thorough field macro-morphological and lithological descriptions, facies and stratigraphic interpretations (Garankina et al., 2019; 2023). Geophysical prospecting was applied to further investigate the structure of the basin's sides and floor. ERT was accomplished with 48-electrode electrical prospecting equipment SKALA 48K12 (Siber 48K12) (Electrometry Design Bureau LLC, Novosibirsk). Pole-dipole array was chosen for achieving the maximal sounding depth while with the dipole-dipole array, it was possible to increase the sounding resolution in the upper part of the cross-section (Loke, 2001). A subme-

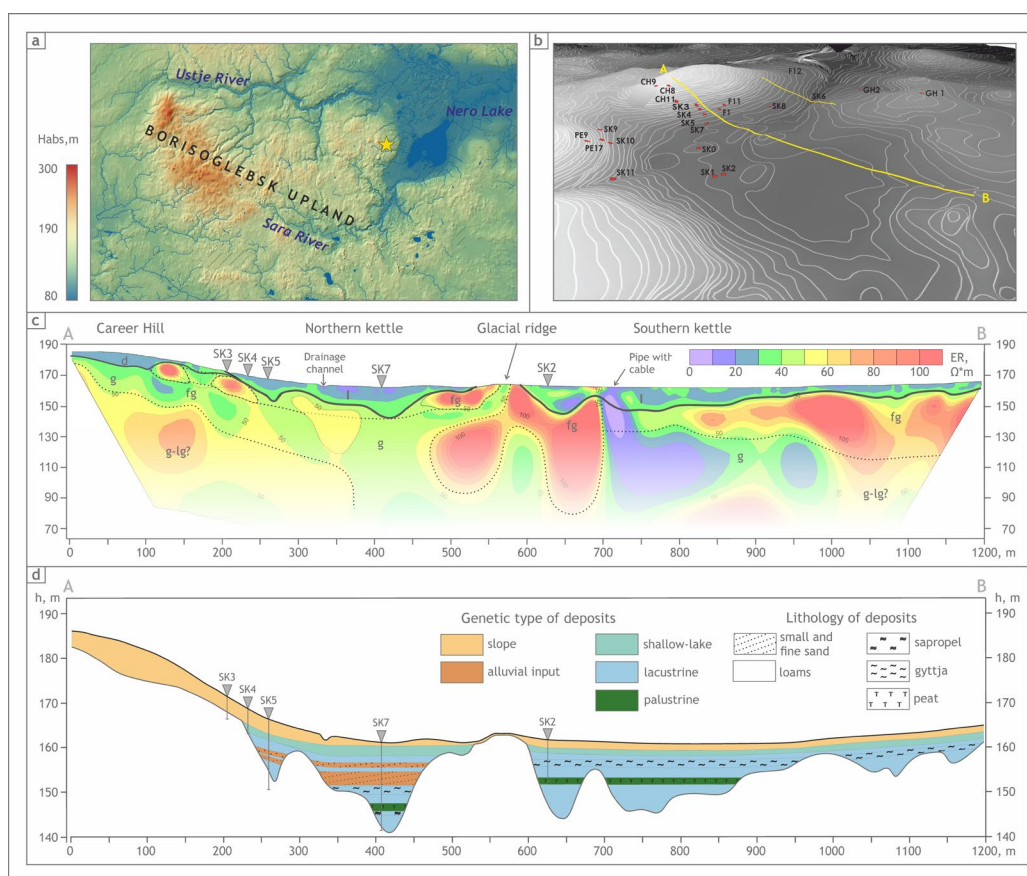


Fig. 1. (a) Location of the key site (yellow star) at the Borisoglebsk Upland. (b) Topography of the Solovey depression (DEM based on a digitized land-planning map of a 1:10000 scale) with positions of cores and pits. Yellow line A–B denotes the location of ERT profile. (c) ERT cross-section. Bold black line designates the floor of buried kettle holes separating the more resistive glacial base from the less resistive postglacial loamy infill. (d) Late Pleistocene geological and paleogeomorphological structure of the depression (above the glacial base) reconstructed from the ERT data coupled with the results of lithological correlation.

ridional profile 1.2 km long was accomplished reaching the maximal depth of sounding up to 70 m owing to the 5 m electrode spacing.

3. Results and discussion

The drilling depth closely corresponds to the postglacial sedimentary thickness decreasing from 20 m in the deepest basin's parts to the first meters on the periphery (Fig. 1d). ERT profile crossed the kettle from the top of a large hill at the north to the toeslope of a smaller knob at the south (Fig. 1b) presenting a rather contrasting picture (Fig. 1c). The major part of the cross-section demonstrates relatively increased electrical resistivity values ($\sim 40\text{--}60 \Omega\cdot\text{m}$) with even higher localized anomalies of up to $\sim 80\text{--}120 \Omega\cdot\text{m}$. The top of the profile (upper 3 to 25 m) reflects noticeably lower resistivity values ($\sim 10\text{--}40 \Omega\cdot\text{m}$) distributed much more homogeneously. The deepest parts of the low-resistive layer correspond well with the thickest lacustrine loamy strata reached by drilling while its reduced thickness closer to the depression's sides is in good agreement with the decreased depth of the low-resistive layer. However, the distribution of low resistivity anomaly in-between the cores differs significantly showing not one but, at least, two pronounced hollows, each with an amplitude bottom topography, divided by a large positive anomaly. That protrusion of highly resistive matter from below matches with the glacial reddish sandy loams coming to the surface of the kettle floor with pebbles and small boulders frequent in the plow horizon. In the modern landscape, a smooth low-rising spur spreads out into the central part of the kettle. A large and extremely low-resistive anomaly ($\leq 10 \Omega\cdot\text{m}$) in the central part of the transect appears to be caused by a buried electric cable.

In frames of the modern flat-bottomed Solovey depression, geological coring indicated a pronounced overdeepening of the glacial base. The northern slope of paleodepression reached up to $17\text{--}20^\circ$ while, at present, it appears as a gentle hill footslope. And the thickest exposed postglacial infill (20.55 m) is bound to the toeslope of the modern depression. Geophysical reconnaissance has confirmed an even greater thickness of the postglacial infill reaching 25 m, yet revealed a much more complicated buried topography (see Fig. 1c). At least, two waterbodies existed in the southern and northern kettles of the initial glacial landscape each with a rather differentiated bottom relief. They persisted as separate basins during the major part of the Late Pleistocene, which is sustained by findings of specific interglacial peats at significantly differing depths (~ 9 and 15.5 m, correspondingly) (Garankina et al., 2019; 2023). The upper parts of the infill also show some considerable differences, such as a remarkable sand input (> 4 m in total) detected only in the northern kettle. A sublatitudinal glacial ridge that divided the kettles is highlighted by the increased electrical resistivity values in the geophysical profile implying it was at least 25 m high and > 200 m in width. Yet in the modern topography, it is poorly visible as a very smooth spur less than a couple of meters high. Such associa-

tions of buried kettle holes and glacial highs jointed into larger flat-bottomed depressions of the modern landscape have been lately found in Poland (Woronko et al., 2018; Mirosław-Grabowska et al., 2021) and the Czech Republic (Hosek et al., 2019) suggesting they reflect a typical tendency of postglacial evolution of initial glacial terrains in marginal zones of both MIS6 and MIS2 glaciations. Thus, local sediment sinks such as kettle holes and dry valleys infilled throughout the postglacial stage can serve not only as records of paleo-environmental changes but also for assessing the scales of watershed denudation and landscape transformation since the last glacial cover degradation.

4. Conclusions

1. Modern smoothed flat-bottomed depressions in paleoglacial landscapes have a rather complex inner structure and may embody several overdeepened kettle holes with much steeper slopes that were completely infilled and merged into one during the postglacial evolution.
2. Postglacial loamy infill is well-defined in the ERT data by its low resistivity in contrast to the rather higher resistive and strongly differentiated deposits of the underlying glacial complex.
3. Application of electrical resistivity tomography in paleogeographic studies of the MIS6 glaciation marginal zone proved to be a useful tool for detecting the postglacial loamy infills of the initial lows of glacial topography. It can be further employed to better understand the actual scales of the postglacial redeposition and landscape modeling during the last 150-130 ka.

5. Acknowledgments

This research was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-77-10063. Paleogeomorphological interpretation was accomplished in frames of state assignment AAAA-A16-11632810089-5 of Geomorphology and Paleogeography Dept., Lomonosov MSU. We are grateful to A.Yu. Kachalov and N.E. Demidov for their drilling experience and V.R. Belyaev, V.Yu. Ukrainsev, A.O. Utkina, A.D. Lisova, N.V. Mokievskiy, I.M. Petrovnin and Yu.V. Shishkina for field assistance and cores' preparation.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4-14. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.024](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024)
- Forysiak J., Majecka A., Marks L. et al. 2018. Eemian to Early Weichselian organic deposits in the watershed ket-

tle-hole basins in central Poland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90: 199–208. DOI: [10.17741/bgsf/90.2.005](https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.005)

Garankina E., Posazhennikova V., Lobkov V. et al. 2023. 2b. Postglacial lacustrine sedimentation. In: *Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook*, 27–30 August 2023. Moscow, pp. 47–63. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-071-3](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-071-3)

Garankina E.V., Belyaev V.R., Shorkunov I.G. et al. 2019. Lake sedimentation as an agent of postglacial transformation of interfluves and fluvial landscapes of the Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 381: 13–20. DOI: [10.5194/piahs-381-13-2019](https://doi.org/10.5194/piahs-381-13-2019)

Karasiewicz M.T., Hulisz P., Noryoekiewicz A.M. et al. 2017. The impact of postglacial palaeoenvironmental changes on the properties of sediments in the kettle hole at the site of Jurki (NE Poland). *Geological Quarterly* 61(2): 305–319. DOI: [10.7306/gq.1346](https://doi.org/10.7306/gq.1346)

Loke M.H. 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Hein M., Urban B., Tanner D.C. et al. 2021. Eemian landscape response to climatic shifts and evidence for northerly Neanderthal occupation at a palaeolake margin in northern Germany. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(14): 2884–2901. DOI: [10.1002/esp.5219](https://doi.org/10.1002/esp.5219)

Hosek J., Prach J., Krizek M. et al. 2019. Weichselian thermokarst landscape discovered in the Czech Republic, central Europe. *Boreas* 48: 988–1005. DOI: [10.1111/bor.12404](https://doi.org/10.1111/bor.12404)

Mirosław-Grabowska J., Borówka R.K., Radzikowska M. et al. 2021. Environmental changes recorded in the sequence of lake-peat bogs in the Eemian Interglacial and Vistulian on the basis of multi-proxy data. *Quaternary International* 632: 51–64. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.11.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.11.023)

Woronko B., Rychel J., Karasiewicz T.M. et al. 2018. Post-Saalian transformation of dry valleys in eastern Europe: an example from NE Poland. *Quaternary International* 467: 161–177. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.09.054](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.054)

Трансформация локальных ледниковых депрессий по геологическим и геофизическим данным, Борисоглебская возвышенность, центр Европейской части России

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYГаранкина Е.В.^{1,2*}, Шоркунов И.Г.¹, Юрченко А.П.¹,
Посаженикова В.С.^{1,2}, Лобков В.А.¹¹ Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017, Россия² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. Позднеплейстоценовую эволюцию центральноевропейских ледниковых ландшафтов часто сводят к воздействию послеледниковой линейной эрозии. Однако обширные между-речья в краевой зоне МИС6 оледенения подвергались также длительному послеледниковому выравниванию в перигляциальных и межледниковых условиях. Локальные седиментационные ловушки, такие как моренные западины, котловины и ложбины, выполнявшиеся отложениями на протяжении всего послеледникового этапа, могут служить не только летописями палеоландшафтных и палеоклиматических изменений, но и для оценки масштабов денудации междуречий и трансформации рельефа со времени деградации последнего ледникового покрова. Нами предпринята попытка использовать электротомографический метод как инструмент палеогеоморфологического исследования локальной плоскодонной котловины, строение которой ранее было изучено традиционным литолого-стратиграфическим методом. Полученный геофизический профиль показал довольно контрастную картину, где на дифференцированном относительно высокоомном ледниковом цоколе лежат более однородные низкоомные линзы мощностью 3-25 м. Последние были сопоставлены послеледниковым склоновым и озерным суглинкам, выполняющим понижения исходного ледникового рельефа. Установлено, что депрессия имеет существенно более сложное внутреннее строение, включая как минимум две погребенные котловины, разделенные моренным валом, ныне практически погребенным под послеледниковой толщей. Большую часть позднего плейстоцена озера в котловинах функционировали отдельно и, вероятно, объединились в один бассейн лишь на его заключительных стадиях. Геофизический разрез также показал весьма изменчивый рельеф дна каждой котловины со значительно более крутыми склонами, чем современные борта депрессии. Таким образом, электротомографические исследования показали себя эффективными для выявления послеледниковых суглинистых выполнений первичных понижений ледникового рельефа и могут быть в дальнейшем использованы для лучшего понимания реальных масштабов послеледникового переотложения вещества и моделировки рельефа в течение последних 150–130 тыс. лет.

Ключевые слова: ледниковый рельеф, древние озера, электротомография, фациальный анализ, озерные отложения, поздний плейстоцен

Для цитирования: Гаранкина Е.В., Шоркунов И.Г., Юрченко А.П., Посаженикова В.С., Лобков В.А. Трансформация локальных ледниковых депрессий по геологическим и геофизическим данным, Борисоглебская возвышенность, центр Европейской части России // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 310-317. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-310

1. Введение

Позднеплейстоценовую эволюцию центральноевропейских ледниковых ландшафтов часто сво-

дят к послеледниковому эрозионному врезанию. Однако обширные междуречья, широко распространенные в краевой зоне МИС6 оледенения, подвергались также длительному послеледниковому

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: evgarankina@gmail.com (Е.В. Гаранкина)

Поступила: 06 июня 2024; **Принята:** 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



выравниванию, обусловленному переотложением ледникового материала склоновыми, эоловыми и другими перигляциальными процессами в локальных седиментационных ловушках, в т.ч. в озерных условиях, и их дополнительным выполнением за счет биогенного осадконакопления торфов, гиттий или сапропелей в более теплые климатические фазы. Однако эти факторы, хоть зачастую и упоминаются как характерные для перигляциальных обстановок, обычно недооцениваются как реальные агенты трансформации ландшафта (Garankina et al., 2019). Корректная оценка их вклада возможна путем изучения литологического строения и объема этих выполнений в локальных ловушках наносов. Фациальные и стратиграфические исследования послеледниковых выполнений моренных западин, замкнутых и полузамкнутых ложбин и более крупных озерных котловин достаточно распространены, однако геоморфологическое строение самих погребенных отрицательных форм исследуется крайне редко (например, Karasiewicz et al., 2017; Forysiak et al., 2018; Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019; Hein et al., 2021; Mirosław-Grabowska et al., 2021), что существенно ограничивает возможности оценки объемов послеледникового сноса и аккумуляции в регионе.

Геофизическая разведка является одним из удобных способов изучения погребенного рельефа.

Поскольку на территории ледниковые пески, суглинки и диамиктон перекрыты суглинистым покровом, электротомография (Woronko et al., 2018; Hosek et al., 2019 и др.), по-видимому, более эффективна, чем георадиолокационное профилирование, но при том и гораздо более доступна, чем сейсморазведка (Hein et al., 2021). Таким образом, электротомография (ЭТ) была выбрана в качестве инструмента для палеогеоморфологического исследования локальной плоскодонной котловины, строение которой ранее было изучено традиционным литолого-стратиграфическим методом (Garankina et al., 2023).

2. Методы и материалы

Соловьевская котловина – небольшая депрессия на северо-востоке Борисоглебской возвышенности примерно в 190 км к северо-востоку от Москвы и в 10 км к запад-юго-западу от Ростова (Ярославская обл.) (Рис. 1а). С деградации последнего МИС6 ледникового покрова (Astakhov et al., 2016) регион испытывал чередование межледниковых (МИС5е, МИС1) и перигляциальных (МИС5d–МИС2) обстановок. В ледниковом рельефе территории преобладают малоамплитудные волнистые равнины, перемежающиеся с крупными холмами и неглубокими депрессиями. Эти котловины в основном сформировались при вытаивании блоков мертвого льда и

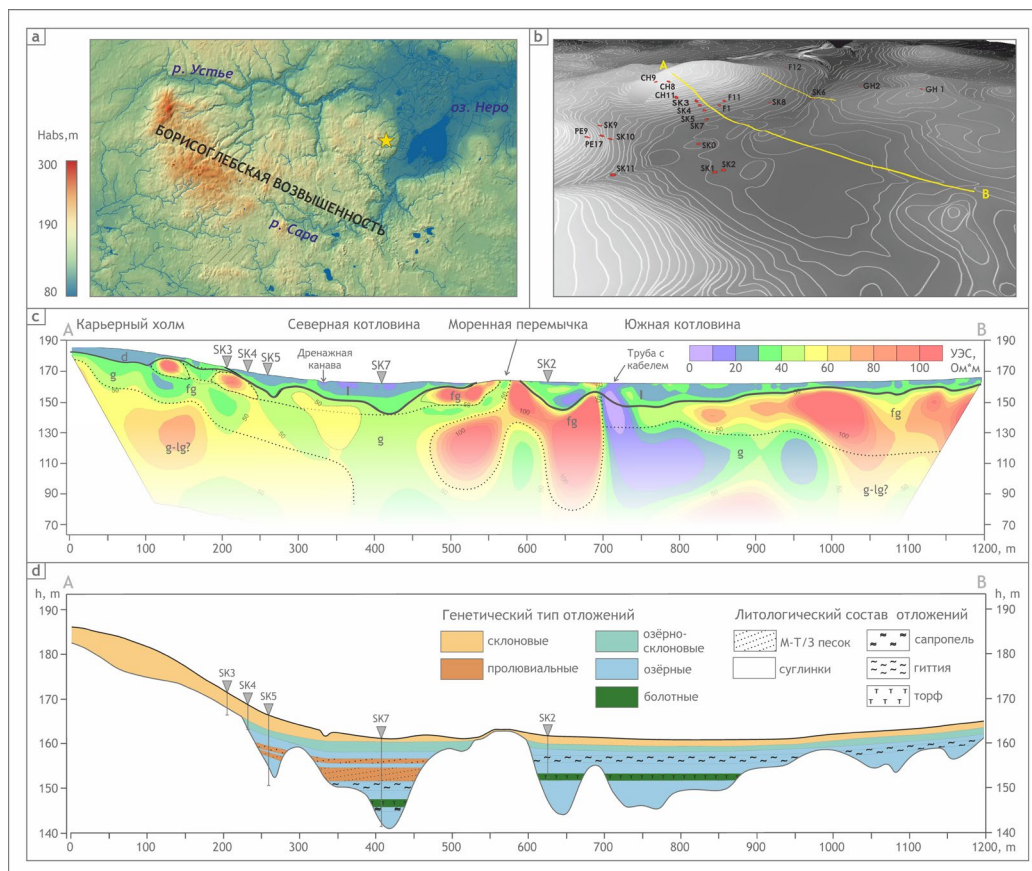


Рис.1. (а) Положение ключевого участка (желтая звездочка) на Борисоглебской возвышенности. (б) Рельеф Соловьевской котловины (ЦМР по данным оцифрованной землеустроительной карты масштаба 1:10000) с положением буровых скважин и шурфов. Желтой линией А–В отмечен ЭТ профиль. (с) Электротомографический разрез. Жирная черная линия отделяет низкоомное суглинистое выполнение древних понижений от более высокоомного ледникового цоколя, отражая сложный погребенный ледниковый рельеф. (d) Позднеплейстоценовое геологическое и палеогеоморфологическое строение депрессии (выше ледникового цоколя), реконструированное по данным ЭТ в сочетании с результатами литологической корреляции.

позднее были заполнены осадками, сейчас представляя собой очень пологие понижения диаметром от 0.5 до 4 км. Соловьевская котловина относится к водосбору оврага Пужбол, находясь за пределами верховьев его правого притока (Рис. 1b). С севера и запада полузамкнутое понижение окаймляют два крупных холма высотой 25–50 м, а с юга и востока – небольшие холмы высотой всего 5–7 м. На юге и северо-востоке слабоогнутого выположенного днища (1.0 км x 0.7 км) котловины прослеживаются два небольших понижения. Южная впадина лишь слегка заболочена, хотя мелководный водоем сохранялся вплоть до мелиорации с помощью искусственной дренажной системы в 1984 г.

В днище и на бортах Соловьевской котловины в ходе ударного ручного, колонкового и шнеково-свайного бурения было исследовано 15 кернов мощностью от 4 до 21.5 м, а строение окружающих междуречий дополнительно изучено в карьерных выработках, а также шурфах на склонах и подножиях холмов. Все керны и обнажения были сфотографированы и снабжены детальными полевыми макроморфологическими и литологическими описаниями, а затем – фациальной и стратиграфической интерпретацией (Garankina et al., 2019; 2023). Геофизическая разведка была применена для детализации строения бортов и днища бассейна. ЭТ профилирование выполнено с помощью 48-канальной электроразведочной аппаратуры «СКАЛА 48К12» (ООО «КБ Электротриетрии», г. Новосибирск). Трехэлектродная установка была выбрана для достижения максимальной глубины зондирования, тогда как с помощью дипольно-осевой установки удалось повысить разрешение зондирования в верхней части разреза (Loke, 2001). Получен субмеридиональный профиль длиной 1.2 км с максимальной глубиной зондирования до 70 м за счет пятиметровой расстановки электродов.

3. Результаты и обсуждение

Глубина бурения близко соответствует мощности послеледниковых отложений, которая изменяется от более 20 м в наиболее глубоких частях бассейна до первых метров на периферии (Рис. 1d). ЭТ профиль пересекает котловину от вершины крупного холма на севере до подножия небольшого холма на юге (Рис. 1b), продемонстрировав довольно контрастную картину (Рис. 1c). Большой части разреза соответствуют относительно повышенные значения удельного сопротивления (~40–60 Ом*м) с локальными аномалиями до ~80–120 Ом*м. Верхняя же часть профиля (от 3 до 25 м) отражает заметно меньшие значения удельного сопротивления (~10–40 Ом*м) и их более однородное распределение. Наибольшая мощность низкоомного слоя согласуется с максимальными вскрытыми глубинами залегания подошвы озерных суглинков, тогда как их уменьшение ближе к бортам котловины соответствует пониженной мощности низкоомного слоя. Однако распределение низкоомных аномалий между скважинами существенно слож-

нее, демонстрируя не одну, а, как минимум, две выраженные впадины. Каждая из них имеет амплитудные перепады подошвы, тогда как друг от друга их отделяет крупная положительная аномалия. Этому выступу высокоомного вещества к поверхности соответствуют выходы красноватых ледниковых супесей, вскрывающихся непосредственно в днище депрессии, часто с щебнистыми и мелковалунными включениями в пахотном горизонте. В современном рельефе это повышенный участок днища котловины, простирающийся в виде плавного невысокого отрога от восточного холма. Крупная очень хорошо проводящая аномалия (< 10 Ом*м) в середине профиля, судя по всему, вызвана заглубленным электрическим кабелем.

В пределах плоскодонной Соловьевской котловины геологическое бурение выявило значительное переуглубление кровли ледникового цоколя. Северный склон палеодепрессии достигал 17–20°, тогда как сейчас ему соответствует пологое подножие склона, а самое мощное послеледниковое выполнение (20.55 м), вскрытое бурением, приурочено к притыловой части котловины. Геофизическая разведка подтвердила даже большую мощность послеледникового заполнения (до 25 м), но выявила и гораздо более сложный погребенный рельеф (см. Рис. 1c). По крайней мере два отдельных водоема существовало в южной и северной впадинах исходного ледникового рельефа, каждая из которых характеризовалась весьма дифференцированным донным рельефом. В разобранном виде бассейны сохранялись на протяжении большей части позднего плейстоцена, о чем свидетельствуют находки специфических межледниковых торфов на существенно разнящихся глубинах (~8.5 и 15.5 м, соответственно) (Garankina et al., 2019; 2023). В верхних частях их выполнений также вскрыты существенные различия как, например, значительный привнос песка (общей мощностью > 4 м), обнаруженный лишь в кернах северной котловины. Субширотный моренный вал, разделявший впадины, выделяется по повышенным значениям удельного электрического сопротивления в геофизическом профиле, что позволяет предположить, что он достигал в высоту 25 м, а в ширину > 200 м. Однако в современной топографии он слабо читается как очень сглаженный отрог восточного холма высотой менее пары метров. Подобные ассоциации погребенных котловин вытаивания мертвого льда и ледниковых повышений, объединенных в современные более крупные плоскодонные депрессии, были недавно обнаружены также в Польше (Woronko et al., 2018; Mirosław-Grabowska et al., 2021) и Чехии (Hosek et al., 2019), что позволяет предположить, что они отражают типичную тенденцию постледниковой эволюции исходных ледниковых ландшафтов в краевых зонах оледенений как времени МИС6, так и МИС2. Таким образом, локальные седиментационные ловушки (моренные западины, котловины и ложбины стока), заполнявшиеся отложениями на протяжении всего послеледникового этапа, могут служить не только свидетельствами палеоэколо-

гических изменений, но и для оценки масштабов денудации на водосборах и трансформации между-речных ландшафтов со времени последней деградации ледниковых покровов.

4. Заключение

1. Современные выположенные плоскодонные депрессии в областях древнего оледенения имеют довольно сложное строение и могут представлять собой несколько слившихся переуглублённых котловин с гораздо более крутыми склонами, практически полностью заполненных в ходе послеледниковой эволюции.
2. Послеледниковое суглинистое выполнение хорошо дешифрируется в данных электротомографической съемки по низкому сопротивлению в отличие от относительно высокоомных и сильнее дифференцированных отложений подстилающего ледникового комплекса.
3. Применение электротомографии при палеогеографических исследованиях краевой зоны МИС6 оледенения оказалось полезным инструментом для выявления мощностей послеледниковых суглинистых выполнений первичных понижений ледникового рельефа. В дальнейшем его можно использовать для лучшего понимания реальных масштабов послеледникового переотложения и моделирования рельефа в течение последних 150–130 тыс. лет.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 23–77–10063. Палеогеоморфологическая интерпретация проведена в рамках ГЗ АААА-А16-11632810089-5 кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ. Мы благодарны А.Ю. Качалову и Н.Е. Демидову за их непревзойденный буровой опыт и В.Р. Беляев, В.Ю. Украинцев, А.О. Уткину, А.Д. Лисову, Н.В. Мокиевского, И.М. Петровнина и Ю.В. Шишкину за оказанную помощь как в поле, так и на этапе обработки буровых кернов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4–14. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.09.024](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.09.024)
- Forysiak J., Majecka A., Marks L. et al. 2018. Eemian to Early Weichselian organic deposits in the watershed kettle-hole basins in central Poland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90: 199–208. DOI: [10.17741/bgsf/90.2.005](https://doi.org/10.17741/bgsf/90.2.005)
- Garankina E., Posazhennikova V., Lobkov V. et al. 2023. 2b. Postglacial lacustrine sedimentation. In: *Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook*, 27–30 August 2023. Moscow, pp. 47–63. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-071-3](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-071-3)
- Garankina E.V., Belyaev V.R., Shorkunov I.G. et al. 2019. Lake sedimentation as an agent of postglacial transformation of interfluvial and fluvial landscapes of the Borisoglebsk Upland, Central European Russia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 381: 13–20. DOI: [10.5194/piahs-381-13-2019](https://doi.org/10.5194/piahs-381-13-2019)
- Karasiewicz M.T., Hulisz P., Noryoekiewicz A.M. et al. 2017. The impact of postglacial palaeoenvironmental changes on the properties of sediments in the kettle hole at the site of Jurki (NE Poland). *Geological Quarterly* 61(2): 305–319. DOI: [10.7306/gq.1346](https://doi.org/10.7306/gq.1346)
- Loke M.H. 2001. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Hein M., Urban B., Tanner D.C. et al. 2021. Eemian landscape response to climatic shifts and evidence for northerly Neanderthal occupation at a palaeolake margin in northern Germany. *Earth Surface Processes and Landforms* 46(14): 2884–2901. DOI: [10.1002/esp.5219](https://doi.org/10.1002/esp.5219)
- Hosek J., Prach J., Krizek M. et al. 2019. Weichselian thermokarst landscape discovered in the Czech Republic, central Europe. *Boreas* 48: 988–1005. DOI: [10.1111/bor.12404](https://doi.org/10.1111/bor.12404)
- Mirosław-Grabowska J., Borówka R.K., Radzikowska M. et al. 2021. Environmental changes recorded in the sequence of lake-peat bogs in the Eemian Interglacial and Vistulian on the basis of multi-proxy data. *Quaternary International* 632: 51–64. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.11.023](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.11.023)
- Woronko B., Rychel J., Karasiewicz T.M. et al. 2018. Post-Saalian transformation of dry valleys in eastern Europe: an example from NE Poland. *Quaternary International* 467: 161–177. DOI: [10.1016/j.quaint.2016.09.054](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.09.054)

Anthropogenic activity in prehistory on the background of Holocene climate changes in the south-eastern Baltic region

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYDruzhinina O.^{1*}, Gedminienė L.², Skhodnov I.³, Burko A.¹¹Herzen University, 48, Nab. Mojki, Saint-Petersburg, 191186, Russia²Nature Research Centre, Vilnius, 08412, Lithuania³Scientific Research Centre Peribaltic Archaeology, Kaliningrad, 236000, Russia

ABSTRACT. Data on natural palaeoarchives combined with archaeological materials from prehistoric sites of the south-eastern Baltic provide a picture of ancient anthropogenic activity and main stages of evolution of local communities starting from the Mesolithic. Modern Analog Technique (MAT) method applied for the Kamyshovoe lake palynological data is used to reconstruct the seasonal temperature and precipitation trends and values during the Holocene. During the Mesolithic, climate conditions changed from those close to the late Glacial through a period of warmer and wetter climate with parameters close to the present day to conditions of climatic optimum, when temperature was several degrees higher than modern ones. These climate conditions existed during the first part of the Neolithic as well, while from about 5500 cal yr BP the climate changed towards colder temperatures and a shift in seasonal moisture content: summers became wetter and winters less snowy. For the Bronze Age, relative temperature stability along with significant precipitation fluctuations are reconstructed. Since the Iron Age, temperatures remain close to modern ones and several “wetter” episodes are distinguished.

Keywords: anthropogenic activity, archaeology, prehistory, palaeoclimate, south-eastern Baltic, Modern Analog Technique method

For citation: Druzhinina O., Gedminienė L., Skhodnov I., Burko A. Anthropogenic activity in prehistory on the background of Holocene climate changes in the south-eastern Baltic region // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 318-321. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-318

1. Introduction

As an interglacial period, the Holocene appears to be an interval of relatively warm and stable climate. However, fluctuations of precipitation and temperature are visible on a more detailed time scale, showing that climate changed essentially during the last 11 700 years (Borisova, 2014). Numerous studies in palaeoclimatology and the humanities underline the substantial role the main climatic fluctuations played in the development of human civilisation (Burke et al., 2021). The history of the natural environment of south-eastern Baltic being in a stage of active formation during the last deglaciation and in the Holocene is recorded in the numerous local palaeoarchives: lacustrine, bog, lagoon sediments. Located at the intersection of several cultural regions, this territory reflects the historical processes that took place in wide areas of Eastern Europe (Druzhinina et al., 2023). At the same time, the presence of unique reserves of amber made the south-

eastern Baltic, known as far back from the Mesolithic, a regional center of exchange, trade and attraction of various cultural traditions, including those associated with ancient technologies. This together provides an opportunity to get a new insight into climate and society interaction in this part of Europe during the Holocene.

2. Materials and methods

The research is based on an overview of the available published palaeoecological information (lakes Kamyshovoe, Chistoe; bogs Kozje, Zedmar etc.) combined with data on economic activities in prehistory obtained from archaeological materials (Druzhinina et al., in prep.). Detailed climatic reconstruction is completed using the Modern Analog Technique (MAT) method (Juggins, 2020), applied for the data from palynological and geochronological analyses of the Kamyshovoe lake sequence (Druzhinina et al., 2023).

*Corresponding author.

E-mail address: olga.alex.druzhinina@gmail.com (O. Druzhinina)

Received: June 01, 2024; Accepted: June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and discussion

According to the MAT reconstruction, during the Mesolithic, people lived in three different types of climatic conditions. From the beginning of the Holocene until 10 400 cal yr BP, the conditions were cold and close to those of the Younger Dryas; this was the time of birch-pine forest dominance. Then a period of warmer and wetter climate with parameters close to the present day began, causing a change in forest structure and increase in the number of deciduous species. The third stage of the Mesolithic, since 8500 cal yr BP, took place in conditions of climatic optimum with the dominance of broad-leaved forests.

The Mesolithic – Neolithic transition coincided with a relatively long climatic cooling (7100 - 6600 cal yr BP). While the first part of the Neolithic still fell during the climatic optimum of the Holocene and era of broad-leaved forests, from about 5500 cal yr BP the climate changed towards colder temperatures and a shift in seasonal moisture content: summers became wetter and winters less snowy. Role of conifers increases in broadleaved forests. Since the Neolithic, a new strategy of settling and economy with stationary settlements occurred, and farming (cattle breeding and plant cultivation) started to play a role in the subsistence strategy of the local population.

The beginning of the Bronze Age corresponds with a start of relative temperature stability in both summer and winter, with values close to modern ones. Along that, significant fluctuations in humidity during this historical period are recorded: maximum values of summer precipitation for the Holocene in the interval 3900 - 3700 cal yr BP and a sharp decrease in humidity in the second half of the period. Available archaeological and palynological evidence show that farming became one of the main occupations during the Bronze Age, and according to geochemical study of the lake sediments, since at least ~3100 cal yr BP metallurgy started to gain importance in life of ancient communities.

The Iron Age was apparently the epoch of the greatest climatic stability with temperatures close to modern ones and lower humidity, except for a wetter interval around 2200 - 2100 cal yr BP. Precipitation increased slightly during the Middle Ages, but remained below modern values. About 1400 cal yr BP (Migration Period) there was a slight temperature fluctuation accompanied by a sharp increase in precipitation, the cause of which should probably be attributed to a dou-

ble volcanic eruption in AD 536 and 540. The smaller scale peak of precipitation reflected the beginning of the Little Ice Age. Since the start of the Iron Age, intensity of anthropogenic activity in the south-eastern Baltic grew till recent, with some interruptions during the Migration period and local differences in its extent related to the Teutonic Order's conquest of the area in the 13-14th centuries.

4. Conclusion

The overview of the archaeological and palaeo-environmental data from the south-eastern Baltic presented on the background of the detailed climatic reconstruction provides a framework for further research of the «climate - human» relation and role of climatic events in the evolution of human society. Increase in archaeological data will make it possible to trace the link between the changes in subsistence strategies of local communities and dynamic environmental conditions during prehistory.

5. Acknowledgments

The research is funded by Russian Science Foundation, project 22-17-00113 (<https://rscf.ru/en/project/22-17-00113>).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Borisova O. 2014. Landshaftno-klimaticheskie izmeneniya v golocene. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaja* [Izvestiya RAS. Geographical series] 2: 5–20. (In Russian)
- Burke A., Peros M., Wren C. et al. 2021. The archaeology of climate change: The case for cultural diversity. *PNAS* 118(30): e2108537118. DOI: [10.1073/pnas.2108537118](https://doi.org/10.1073/pnas.2108537118)
- Druzhinina O., Stančikaitė M., Gedminienė L. et al. 2023. Anthropogenic impact on the landscape of the Vishtynets Upland (Kaliningrad region, SE Baltic) in prehistory and Middle Ages: a multi-proxy palaeoenvironmental study. *Quaternary International* 20(2023): 145-159. DOI: [10.1016/j.quaint.2022.05.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.016)
- Juggins S. 2020. *Rioja: analysis of quaternary science data*. version 0.9–26. <https://cran.r-project.org/package=rioja> (accessed 2 June 2023)

Антропогенная деятельность в эпохи камня и палеометалла на фоне изменения климата в голоцене на территории юго-восточной Прибалтики

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYДружинина О.^{1*}, Гедминиене Л.², Сходнов И.³, Бурко А.¹¹РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, 191186, Россия²Центр исследований природы, Вильнюс, 08412, Литва³НИЦ Прибалтийская археология, Калининград, 236000, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлен обзор археологических и палеоэкологических данных юго-восточной Балтики на фоне реконструкции климата голоцена. Метод «современных аналогов» (MAT) применительно к палинологическим данным оз. Камышовое использован для реконструкции трендов и сезонных значений температуры и осадков для разных этапов голоцена. Установлено, что в течение мезолита климатические условия менялись от близких к позднеледниковью через период более теплого и влажного климата с параметрами, близкими к современному, к условиям климатического оптимума, когда температура была на несколько градусов выше современной. В то время как первая часть неолита соответствовала климатическому оптимуму, примерно с 5500 кал. л. н. климат изменился в сторону похолодания и смещения сезонного выпадения осадков: лето стало более влажным, а зима менее снежной. Реконструкции показывают, что бронзовый век был периодом с относительной температурной стабильностью, но значительными колебаниями количества осадков. Начиная с железного века, температура, по-видимому, остается близкой к современным значениям. Выделяются несколько более «влажных» эпизодов, совпадающих с началом Римского времени, периодом Великого переселения народов и малым ледниковым периодом в эпоху Средневековья.

Ключевые слова: антропогенная деятельность, археология, эпоха камня и палеометалла, палеоклимат, юго-восточная Прибалтика, метод современных аналогов

Для цитирования: Дружинина О., Гедминиене Л., Сходнов И., Бурко А. Антропогенная деятельность в эпохи камня и палеометалла на фоне изменения климата в голоцене на территории юго-восточной Прибалтики // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 318-321. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-318](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-318)

1. Введение

Голоцен как межледниковье - это период относительно теплого и стабильного климата. Однако на протяжении голоцена происходили многочисленные колебания количества осадков и температуры, показывая, что климат существенно менялся в течение последних 11700 лет (Борисова, 2014). Многие исследования в палеоклиматологии и гуманитарных науках подчеркивают существенную роль коротко-периодных климатических колебаний в развитии человеческой цивилизации (Burke et al., 2021). Природная среда юго-восточной Прибалтики находилась в стадии активного формирования в конце плейстоцена и в голоцене, что зафиксировано в многочисленных природных архивах: озерных, болотных, лагунных отложениях. Расположенная на стыке нескольких культурных

регионов, эта территория отражает те исторические процессы, которые происходили на обширных территориях Восточной Европы (Druzhinina et al., 2023). В то же время, наличие уникальных запасов янтаря сделало юго-восточную Прибалтику уже с мезолита региональным центром обмена, торговли и притяжения различных культурных традиций, в том числе связанных с древними технологиями. Все это вместе дает возможность детального изучения проблемы взаимодействия климата и общества в этой части Европы в голоцене.

2. Материалы и методы

Исследование основано на обзоре имеющейся опубликованной палеогеографической информации (оз. Камышовое, Чистое; бол. Козье, Цедмар

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: olga.alex.druzhinina@gmail.com (О. Дружинина)

Поступила: 01 июня 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



и др.) и археологических данных о хозяйственной деятельности в эпохи камня и палеометалла (Druzhinina et al., in prep.). Детальная климатическая реконструкция выполнена с использованием метода Modern Analog Technique (MAT) (Juggins, 2020), примененного данным палинологического и геохронологического анализа донных осадков оз. Камышовое (Druzhinina et al., 2023).

3. Результаты и обсуждение

Установлено, что в течение мезолита (~ 11 700 – 6500 кал.л.н.) климатические условия менялись от близких к позднеледниковью через период более теплого и влажного климата с параметрами, близкими к современным, к условиям климатического оптимума, когда температура была на несколько градусов выше современной. Согласно археологическим данным, мезолитические стратегии жизнеобеспечения основывались на рыболовстве и охоте, наряду с активным освоением лесных растительных ресурсов, однако из-за скудности имеющегося фактического материала проследить изменения в деятельности человека, соответствующие динамике климата и палеосреды, сложно.

В то время как первая часть неолита соответствовала климатическому оптимуму, примерно с 5500 кал. л. н. климат изменился в сторону похолодания и смещения сезонного выпадения осадков: лето стало более влажным, а зима менее снежной. В стратегии жизнеобеспечения неолитического населения разведение скота и земледелие начало играть возрастающую роль, приобретя еще большее значение в бронзовом веке (~ 4000 – 2800 кал.л.н.), периоде с относительной температурной стабильностью, но значительными колебаниями количества осадков. Геохимические исследования отложений оз. Камышовое показывают, что, по крайней мере, с ~3100 кал.л.н. металлургия становится еще одним важным занятием в жизни местного населения.

С началом железного века (~ 2800 кал.л.н.) интенсивность антропогенной деятельности (земледелия, скотоводства и металлургии) в юго-восточной Прибалтике возрастала, с некоторыми перерывами в периоды Великого переселения народов (5-6 вв. н. э.) и завоевания данной территории Тевтонским орденом в 13-14 вв. н.э. Согласно прове-

денным реконструкциям, начиная с железного века, температура остается близкой к современным значениям. Выделяются несколько более «влажных» эпизодов, совпадающих с началом Римского времени, периодом Великого переселения народов и малым ледниковым периодом в эпоху Средневековья.

4. Заключение

Обзор археологических и палеоэкологических данных юго-восточной Прибалтики в совокупности с детальными палеоклиматическими реконструкциями, создает основу для дальнейшего исследования роли коротко-периодных климатических изменений в эволюции человеческого общества. Увеличение массива археологических данных позволит проследить связь между изменениями в стратегиях жизнеобеспечения древнего населения и динамичными условиями окружающей среды в эпохи камня и палеометалла.

Благодарности

Исследование проводится при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-00113, <https://rscf.ru/project/22-17-00113>.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Список литературы

- Борисова О. 2014. Ландшафтно-климатические изменения в голоцене. Известия РАН. Серия географическая 2: 5–20.
- Burke A., Peros M., Wren C. et al. 2021. The archaeology of climate change: The case for cultural diversity. PNAS 118(30): e2108537118. DOI: [10.1073/pnas.2108537118](https://doi.org/10.1073/pnas.2108537118)
- Druzhinina O., Stančikaitė M., Gedminienė L. et al. 2023. Anthropogenic impact on the landscape of the Vishtynets Upland (Kaliningrad region, SE Baltic) in prehistory and Middle Ages: a multi-proxy palaeoenvironmental study. Quaternary International 20(2023): 145-159. DOI: [10.1016/j.quaint.2022.05.016](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.05.016)
- Juggins S. 2020. Rioja: analysis of quaternary science data. version 0.9–26. <https://cran.r-project.org/package=rioja>. (accessed 2 June 2023)

Influence of organic matter content on Cladocera distribution in lakes of the Kola-Karelian region



Ibragimova A.G.^{1,2*}, Subetto D.A.³, Potakhin M.S.⁴, Belkina N.A.⁴, Grekov I.M.³, Kotov A.A.¹, Frolova L.A.^{2,5}

¹A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences, Leninsky Prospect 33, 119071, Moscow, Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kremlevskaya Street 18, 420008, Kazan, Russia

³Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika Embankment 48, 191186, St. Petersburg, Russia

⁴Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, A. Nevskogo Street 50, 185003, Petrozavodsk, Russia

⁵PaleoData Lab, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS, Kutateladze Street 7/3, 630090, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT. The analysis of loss on ignition (LOI) is widely used in paleolimnological reconstructions to understand the conditions of sedimentation and to identify the input of organic matter from external sources as well as pollution in lakes. For the first time in Russia, the influence of organic matter content on Cladocera distribution in five columns of lake bottom sediments in the Kola-Karelian region was analyzed. Using linear regression in the PAST program, it was found that *Biapertura affinis*, *Alona quadrangularis* and *Camptocercus rectirostris* increase in abundance with rising organic matter content, whereas *Chydorus cf. sphaericus* and *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* thrive in conditions of low organic matter content.

Keywords: Cladocera, subfossil remains, Holocene, organic matter, bottom sediments, LOI

For citation: Ibragimova A.G., Subetto D.A., Potakhin M.S., Belkina N.A., Grekov I.M., Kotov A.A., Frolova L.A. Influence of organic matter content on Cladocera distribution in lakes of the Kola-Karelian region // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 322-327. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-322

1. Introduction

Loss on ignition (LOI) analysis is a technique for estimating the organic matter content of sediments that is widely used in palaeolimnological studies due to its ease of application (e.g. Beaudoin, 2003). The organic matter content of a water body is known to have a significant influence on the composition of its flora and fauna. For example, branchiopod crustaceans respond quickly to the impact of various environmental factors by changing their functional parameters and species composition (Korhola and Rautio 2001). This property allows them to serve as objects for studying the limits of stability of organisms, and also allows them to be effectively used as biological indicators of environmental conditions and to apply their remains in paleoreconstructions (Kotov, 2013; Korhola and Rautio, 2001). In addition, the rather short period of generation change allows us to quickly trace the emerging trends on the basis of changes in the community structure.

2. Materials and methods

The study material was 146 sediment samples from 5 lakes of the Kola-Karelian region (Maloe Shibrozero, Gakhkozero, South Haugilampi, Medvedevskoe, Antyukh-Lambina) (Ibragimova et al., 2018; Nazarova et al., 2020). The LOI was analysed by weight after samples were calcined at 500 °C in a muffle furnace. Samples for cladoceran analysis were prepared according to the standard methodology (Korhola and Rautio, 2001), and identification of residues was carried out according to the definitions of modern and subfossil branchiopod crustaceans (Kotov, 2016; Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007). The relationship between the occurrence of statistically significant taxa (comprising more than 0.8%) and the organic content of sediment layers was assessed using linear regression analysis in the PAST software package (Linear, multivariate - one independent, n dependent). The data is visually represented using Species packing (Gaussian) as described by ter Braak and van Dam (1989) in the PAST software program.

*Corresponding author.

E-mail address: Ais5_ibragimova@mail.ru (A.G. Ibragimova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results

Using linear regression (linear, multivariate - one independent, n dependent), we analyzed the dependence of the occurrence of statistically significant taxa (*Acroperus harpae*, *Biapertura affinis*, *Alona quadrangularis*, *Alona guttata/ Coronatella rectangula*, *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina*, *Camptocercus rectirostris*, *Chydorus cf. sphaericus*) in five lakes of the Kola-Karelian region on the organic content in bottom sediment layers. The degree of dependence and significance of the obtained results were also calculated. For all obtained values, the significance level was less than 0.05 (a high level) (Fig. 1). According to the obtained results, *C. rectirostris* increases its abundance at high organic matter content in bottom sediments by 67.99%, whereas at minimum organic matter content, *C. cf. sphaericus* is the most successful among Cladocera (36.18%).

4. Discussion

According to the data obtained during the study of five lakes in the Kola-Karelian region, it was found that *Biapertura affinis*, *Alona quadrangularis* and *Camptocercus rectirostris* increase their abundance as the organic matter content increases, whereas *Chydorus cf. sphaericus* and *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* are able to develop actively at low organic matter content. *Chydorus cf. sphaericus* can successfully develop in both eutrophic and oligotrophic water bodies, with the latter state being apparently characteristic of the early stages of water body filling after the end of glaciation (Smirnov, 2010). The dominance of *C. cf. sphaericus* in the late Pleistocene-early Holocene is a typical occurrence in lakes of glaciogenic origin. This taxon often acts as a pioneer species and quickly colonizes a water body, possessing all adaptations to the littoral lifestyle, while also massively developing in plankton in the presence of suspended algae and other organic particles (Korhola and Rautio, 2001). The increase in the proportion of the taxon in the Late Holocene is usually associated with eutrophication. The maximum development of *B. (E.) cf. longispina* reaches 37.77% of organic matter content, which corresponds to the ecology of

the cold-water oligotrophic taxon *B. (E.) cf. longispina*, while development at medium values of organic matter content corresponds to the ecological preferences of *Bosmina coregoni* living in mesotrophic conditions.

5. Conclusions

The expected result of the study was to obtain information about the increase in the abundance of *C. rectirostris* as the organic matter content increases. It is likely that the species will behave similarly in Central Russia and in more southern regions. However, the data on *C. cf. sphaericus* are specific and closely related to the origin of the studied lakes. Thus, it is assumed that *C. cf. sphaericus* will develop along a different trajectory in lakes in the temperate climatic belt and to the south.

Acknowledgements

The study is performed in frames of the Federal Governmental Task AAAA-A18-118042490059-5 for A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution of Russian Academy of Sciences. The research of Lake Torosjarvi by A.G. Ibragimova was carried out with the financial support of RSF grant 24-77-00020.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Beaudoin A. 2003. A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments. *J. Paleolim.* 29: 387–390. DOI: [10.1023/A:1023972116573](https://doi.org/10.1023/A:1023972116573)
- ter Braak C., van Dam H. 1989. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia.* 178: 209–223.
- Ibragimova A.G., Frolova L.A., Subetto D.A. et al. 2018. The changes in the composition of Cladocera community in bottom sediments of Lake Maloye Shirozero (Zaonezhsky Peninsula) as a consequence of shifts of environmental and climatic conditions. *IOP Publishing Limited. Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 107: 012029. DOI: [10.1088/1755-1315/107/1/012029](https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012029)

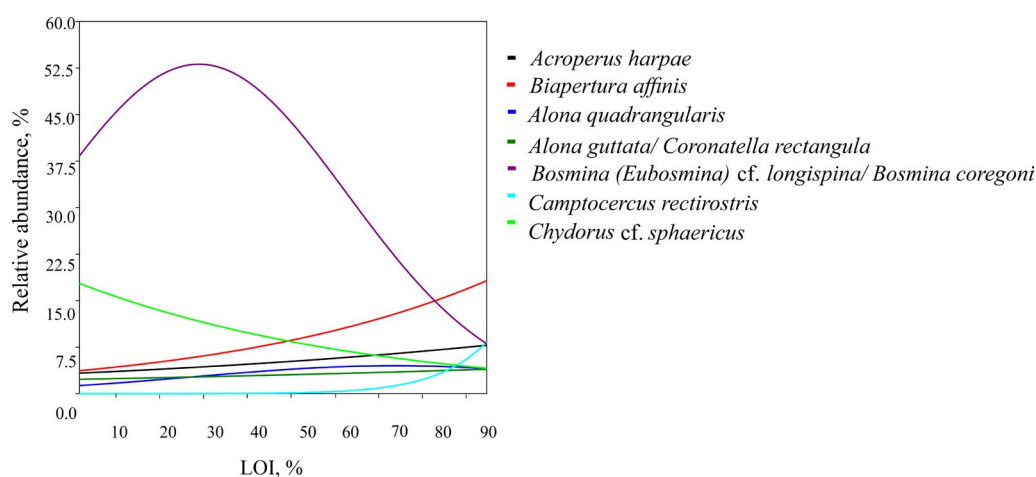


Fig.1. Dependence of the occurrence of statistically significant taxa in five lakes of the Kola-Karelian region on the organic content in bottom sediment layers.

Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. Tracking environmental change using lake sediments. Zoological indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 4: 125–165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)

Kotov A.A. 2013. Morphology and phylogeny of Anomopoda (Crustacea: Cladocera). Moscow: KMK Scientific Press Ltd. (in Russian).

Kotov A.A. 2016. Faunistic complexes of the Cladocera (Crustacea, Branchiopoda) of Eastern Siberia and the Far East of Russia. *Biology Bulletin*. 43 (9): 970–987. DOI: [10.1134/S1062359016090041](https://doi.org/10.1134/S1062359016090041)

Nazarova L., Strykh L., Mayfield R. et al. 2020. Palaeoecological and palaeoclimatic conditions in Karelian Isthmus (north-western Russia) during the Holocene: multiproxy analysis of sediments from the Lake Medvedevskoe. Quaternary research. University of Washington. Cambridge University Press. 95: 65–83. DOI: [10.1017/qua.2019.88](https://doi.org/10.1017/qua.2019.88)

Smirnov N.N. 2010. Historical ecology of freshwater zoocenoses. Moscow: KMK Scientific Press Ltd. (in Russian).

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Świecie: Friends of the Lower Vistula Society.

Влияние содержания органического вещества на распределение Cladocera в озёрах Кольско-Карельской провинции

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYИбрагимова А.Г.^{1,2*}, Субетто Д.А.³, Потахин М.С.⁴, Белкина Н.А.⁴, Греков И.М.³, Котов А.А.¹, Фролова Л.А.^{2,5}¹ Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук, Ленинский проспект, 33, 119071, Москва, Россия² Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, 420008, Казань, Россия³ Российский государственный педагогический университет имени А.И. Герцена, Набережная Мойки, 48, 191186, Санкт-Петербург, Россия⁴ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, улица А. Невского, 50, 185003, Петрозаводск, Россия⁵ Лаборатория палеоданных, Институт археологии и этнографии СО РАН, ул. Кутателадзе 7/3, 630090, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ. Анализ потерь при прокаливании (ППП) широко используется в палеолимнологических реконструкциях для восстановления условий осадконакопления, выявления поступления органической составляющей извне и загрязнения озер. Впервые для территории России проведен анализ влияния содержания органического вещества на распределение Cladocera в 5 колонках донных отложений озёр Кольско-Карельской провинции. С применением линейной регрессии программы PAST было установлено, что *Biapertura affinis*, *Alona quadrangularis* и *Camptocercus rectirostris* увеличивают свою численность по мере увеличения содержания органических веществ, тогда как *Chydorus cf. sphaericus* и *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* активно развиваются при низком его содержании.

Ключевые слова: cladocera, субфоссильные остатки, голоцен, органическое вещество, донные отложения, ППП

Для цитирования: Ибрагимова А.Г., Субетто Д.А., Потахин М.С., Белкина Н.А., Греков И.М., Котов А.А., Фролова Л.А. Влияние содержания органического вещества на распределение Cladocera в озёрах Кольско-Карельской провинции // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 322-327. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-322

1. Введение

Анализ потери при прокаливании (ППП) - это метод оценки содержания органического вещества в донных отложениях, который благодаря своей простоте применения широко используется в палеолимнологических исследованиях (например, Beaudoin, 2003). Известно, что содержание органического вещества в водоеме оказывает значительное влияние на состав его флоры и фауны. К примеру, ветвистоусые ракообразные быстро реагируют на воздействие различных факторов среды изменением своих функциональных показателей и видового состава (Korhola and Rautio, 2001). Это свойство позволяет им служить объектами изучения пределов устойчивости организмов, а также позволяет эффективно использовать их в качестве

биологических индикаторов экологических условий и применять их остатки в палеореконструкциях (Котов, 2013; Korhola and Rautio, 2001). Кроме того, довольно короткий период смены поколений позволяет на основе изменений в структуре сообщества быстро отследить наметившиеся тенденции.

2. Материал и методы

Материалом исследования послужили 146 проб донных отложений из 5 озер Кольско-Карельской провинции (Малое Шиброзера, Гахкозеро, Южное Хаугилампи, Медведевское, Антюх-Ламбина) (Ibragimova et al., 2018; Nazarova et al., 2020). Анализ ППП проводился весовым способом после прокаливании образцов при температуре

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: Ais5.ibragimova@mail.ru (А.Г. Ибрагимова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



500 °С в муфельной печи. Образцы для кладоцерного анализа подготавливали по стандартной методике (Korhola and Rautio, 2001), идентификация остатков проводилась по определителям современных и субфоссильных ветвистоусых ракообразных (Kotov, 2016; Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007). Зависимость встречаемости статистически значимых таксонов (более 0,8%) от содержания органики в слоях донных отложений была выявлена в пакете PAST с применением линейной регрессии (Linear, multivariate - one independent, n dependent). Графически материал представлен с применением Species packing (Gaussian) (ter Braak and van Dam, 1989) в программе PAST.

3. Результаты

С применением линейной регрессии (Linear, multivariate - one independent, n dependent) была выявлена зависимость встречаемости статистически значимых таксонов (*Acroperus harpae*, *Biapertura affinis*, *Alona quadrangularis*, *Alona guttata/ Coronatella rectangula*, *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina*, *Camptocercus rectirostris*, *Chydorus cf. sphaericus*) в пяти озёрах Кольско-Карельской провинции от содержания органики в слоях донных отложений. Также рассчитана степень зависимости и значимость полученных результатов. Для всех полученных значений уровень значимости был менее 0,05 (высокий уровень) (Рис. 1). Согласно полученным результатам, *C. rectirostris* увеличивает свою численность при высоких показателях содержания органического вещества в донных отложениях – 67.99%, тогда как при минимальном содержании органики успешнее всего из Cladocera развивается *C. cf. sphaericus* (36.18%).

4. Обсуждение

Согласно данным, полученным при исследовании пяти озёр Кольско-Карельской провинции, установлено, что *Biapertura affinis*, *Alona*

quadrangularis и *Camptocercus rectirostris* увеличивают свою численность по мере увеличения содержания органических веществ, тогда как *Chydorus cf. sphaericus* и *Bosmina (Eubosmina) cf. longispina* способны активно развиваться при низком его содержании. *C. cf. sphaericus* может успешно развиваться как в эвтрофных, так и в олиготрофных водоёмах, а именно последнее состояние было, видимо, характерно для ранних этапов заполнения водоёмов после окончания оледенения (Смирнов, 2010). Доминирование *C. cf. sphaericus* в конце плейстоцена - начале голоцена является типичной картиной для озёр гляциогенного происхождения. Таксон часто выступает в роли пионерного вида и быстро колонизирует водоем, обладает всеми адаптациями к литоральному образу жизни, при этом он же в массе развивается и в планктоне при наличии взвешенных водорослей и иных органических частиц (Korhola and Rautio, 2001). Увеличение доли таксона в позднем голоцене принято связывать с эвтрофикацией. Максимального развития *B. (E.) cf. longispina* достигает при 37.77% содержании органического вещества, что вполне соответствует экологии холодноводного олиготрофного таксона *B. (E.) cf. longispina*, развитие при средних значениях содержания органического вещества соответствует экологическим предпочтениям *Bosmina coregoni*, обитающего в мезотрофных условиях.

5. Заключение

Ожидаемым результатом исследования было получение сведений об увеличении численности *Camptocercus rectirostris* по мере увеличения содержания органических веществ. Вероятно, что вид будет аналогично вести себя и на территории Центральной части России и в более южных регионах. Однако данные по *C. cf. sphaericus* являются специфичными и тесно связаны с происхождением исследованных озёр. Так, предполагается, что в озёрах умеренного климатического пояса и южнее *C. cf. sphaericus* будет развиваться по другой траектории.

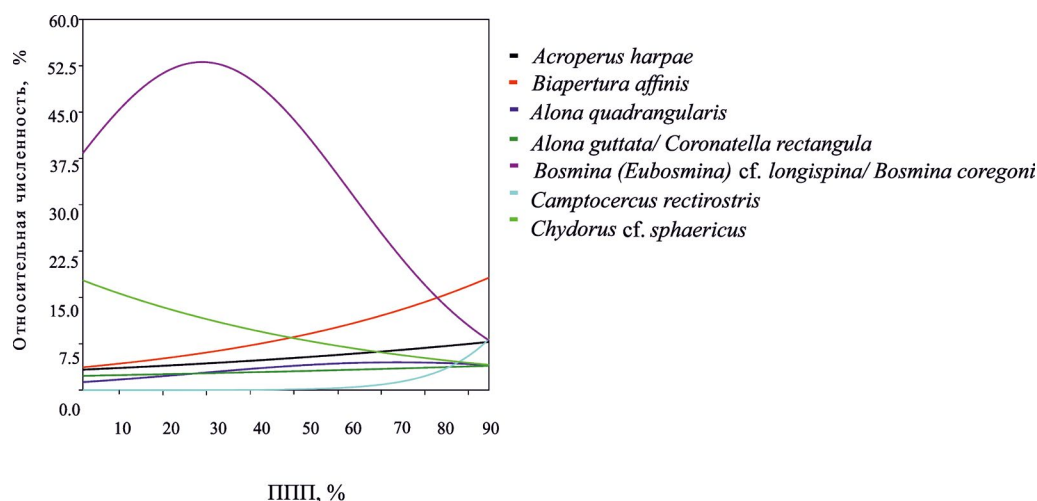


Рис.1. Зависимость численности таксонов Cladocera от содержания органического вещества в исследованных озёрах Кольско-Карельской провинции

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Федерального государственного задания АААА-А18-118042490059-5 для Института проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук. Исследование озера Торосьярви А.Г. Ибрагимовой выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 24-77-00020.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Котов А.А. 2013. Морфология и филогения Аноморода (Crustacea: Cladocera). М.: Товарищество научных изданий КМК.

Смирнов Н.Н. 2010. Историческая экология пресноводных зооценозов. М.: Т-во научных изданий КМК.

Beaudoin A. 2003. A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments. *J. Paleolim.* 29: 387–390. DOI: [10.1023/A:1023972116573](https://doi.org/10.1023/A:1023972116573)

ter Braak C., van Dam H. 1989. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia.* 178: 209–223.

Ibragimova A.G., Frolova L.A., Subetto D.A. et al. 2018. The changes in the composition of Cladocera community in bottom sediments of Lake Maloye Shirozero (Zaonezhsky Peninsula) as a consequence of shifts of environmental and climatic conditions. IOP Publishing Limited. Conf. Series: Earth and Environmental Science. 107: 012029. DOI: [10.1088/1755-1315/107/1/012029](https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012029)

Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. Tracking environmental change using lake sediments. Zoological indicators. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 4: 125–165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)

Kotov A.A. 2016. Faunistic complexes of the Cladocera (Crustacea, Branchiopoda) of Eastern Siberia and the Far East of Russia. *Biology Bulletin.* 43 (9): 970–987. DOI: [10.1134/S1062359016090041](https://doi.org/10.1134/S1062359016090041)

Nazarova L., Syrykh L., Mayfield R. et al. 2020. Palaeoecological and palaeoclimatic conditions in Karelian Isthmus (north-western Russia) during the Holocene: multiproxy analysis of sediments from the Lake Medvedevskoe. Quaternary research. University of Washington. Cambridge University Press. 95: 65–83. DOI: [10.1017/qua.2019.88](https://doi.org/10.1017/qua.2019.88)

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. Świecie: Friends of the Lower Vistula Society.

Paleogeographic conditions of the Donuzlav Lake formation in the Holocene (Northwestern Crimea)



Erokhova M.S.^{1,*}, Kulkova M.A.¹, Markova M.A.¹, Streltsov M.A.¹,
Kuznetsov D.D.², Kochubey O.V.³, Kashuba M.T.⁴

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, 191186 Russia

² Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196105 Russia

³ VNIGRI, 192019 Russia

⁴ Institute of History of Material Culture, Russian Academy of Sciences, 191186 Russia

ABSTRACT. The article is devoted to the reconstruction of paleoclimatic conditions in the Holocene and the influence of anthropogenic factors according to the study of bottom sediments of Lake Donuzlav (Northwestern Crimea). For this purpose, methods of geochemical, granulometric, and spore-pollen analyses of the lake sediments were used. The sediment was sampled using a Russian drill. X-ray spectral fluorescence analysis and calcination loss analysis were conducted to determine the chemical composition of the deposits. The correlation of the paleoclimatic data of sedimentation of lake sediments with the conditions of formation of the cultural layer at the settlement of the late Bronze Age Donuzlav 10 allowed us to establish the living conditions of people. The beginning of sediment formation in the lake Donuzlav belongs to the subboreal period. Changes in the water level in the lake are associated with changes in the climatic factors, mainly changes in climate humidity. At the end of the Subboreal period and the beginning of the Atlantic period, an increase in anthropogenic impact on the watershed is noted. During the same time, late Bronze Age settlements with livestock enclosures developed. Aridization of the climate at the end of the subboreal period led to a decrease in the water level in the lake and an increase in the salinity of the lake.

Keywords: bottom lake sediments, reconstruction of the paleoclimate in the Holocene, geochemical indicators, spore-pollen analysis, salt lakes, late Bronze Age, Northwestern Crimea

For citation: Erokhova M.S., Kulkova M.A., Markova M.A., Streltsov M.A., Kuznetsov D.D., Kochubey O.V., Kashuba M.T. Paleogeographic conditions of the Donuzlav Lake formation in the Holocene (Northwestern Crimea) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 328-333. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-328

1. Introduction

The lakes of the Crimean Peninsula have always attracted the attention of researchers both scientifically and economically and already in the 20-30s of the twentieth century the beginning of research on salt lakes was laid (Kurnakov et al., 1936). The first data in the field of reconstruction of the isolation conditions of lakes in the western part of Crimea were presented relatively recently. The bottom sediments of Lake Saksy and Lake Jarylgach have been studied by comprehensive studies (Subetto et al., 2023).

Lake Donuzlav is the second largest and deepest lake in Northwestern Crimea, located between the Tarkhankut Peninsula in the northwest and the

Yevpatoria Plateau in the southeast and belongs to the Tarkhankut group of mineral lakes. Basing on the values of the metamorphosis coefficient for brine Donuzlav lake can be attributed to a typical marine-type lake, which separated from the sea about 4.5 thousand years ago (Kurnakov et al., 1936). The study of lake sediments and the reconstruction of sedimentogenesis conditions of lake bottom sediments is an important task not only to establish the dynamics of climatic processes in the Holocene and obtain new data on the assessment of anthropogenic influence, but also for the investigation of the vital activity of ancient communities in this region which is of cultural and historical value for the Crimean Peninsula.

*Corresponding author.

E-mail address: slenderina135@gmail.com (M.S. Erokhova)

Received: June 09, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2. Materials and methods

The sampling of sediments for geochemical, granulometric and spore-pollen analysis was carried out in the open part of the lake from a floating stable platform using a Russian drill by employees of the Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences (D.D. Kuznetsov, T.V. Sapelko). GPS coordinates of sampling points: 45.47618°N, 33.25336°E. The lithology of deposits in the core is presented as follows: at a depth of 2.03-2.19 m - gray homogeneous gyttja clay; 2.19-2.23 m - black homogeneous gyttja clay; 2.23-2.74 m - black homogeneous clay gyttja with large fragments of plant macrostages; 2.74-2.87 m - dark gray dense weakly layered clay siltstone.

From the sampled core 40 sediment samples were selected for each 2-3 cm. For geochemical analysis, the samples were dried at $T = 105^{\circ}\text{C}$, ground in a jasper mortar to a powder state and pressed into a tablet on a boric acid substrate. The analysis was carried out using an X-ray fluorescence wave dispersion spectrometer "Spectroscan MAX-GV". Concentrations of 32 rock-forming oxides and trace elements were determined. The following geochemical indicators demonstrating changes in sedimentogenesis conditions were calculated: $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (Gerrard, 1984), Rb/Sr , $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Nesbitt and Young, 1982), SiO_2 biogenic (Keller, 1963), CaO/MgO , P_2O_5 anthropogenic (Kulkova, 2012). Losses on ignition (LOI) at 550°C and 950°C were determined, showing the content of organic and carbonate-sulfate components.

To establish the granulometric composition, the samples were prepared and analyzed using the LASKA-TD laser particle analyzer using a standard technique (Kuvshinova and Sardaeva, 2016).

The spore-pollen analysis of bottom sediments was performed by O.V. Kochubey, an employee of the VNIGRI Laboratory of Palynological research according to the standard methodology (Grychuk and Zaklanskaya, 1948).

To reconstruct the paleogeographic conditions at the archaeological site of the Late Bronze Age Donuzlav-10, sediment samples were taken from the section of the pit wall at the settlement located on the shore of the lake Donuzlav. Geographical coordinates of the central part of the settlement are $45^{\circ}26.762'\text{N}$, $33^{\circ}14.856'\text{E}$. Deposits are presented from top to bottom: 0-7 cm - turf layer; 7-14 cm - deposits of dense brown sandy loam; 14-35 cm light brown loam; 35-40 cm - carbonate crushed stone. Geochemical and granulometric analyses of sediments were used to reconstruct the paleoclimate. Radiocarbon determination of the age of the cultural layer deposits at a height of 14-35 cm was carried out using extracts of humic acids from soils in the radiocarbon laboratory of the A.I. Herzen Russian State Pedagogical University using a traditional radiometric technique using a scintillation counter "Quantulus-1220".

3. Results and discussion

Two palinozones were detected during the spore-pollen analysis. Palinozone 1 (depth 2.77-2.85 m) is characterized by a predominance of pollen from herbaceous plants, among which representatives of the Chenopodioideae (*Chenopodiaceae gen. indet.*) dominate. Palinozones similar in composition can be traced in the subboreal sediments of the Jarylgach lake (Subetto et al., 2023).

The palinospectrums of palinozone 2 (depth 2.29-2.68 m) are still dominated by representatives of the grass-shrub group, among which the communities consisting mainly of Chenopodioideae confidently dominate (in total from 34 to 52%). The subdominants are representatives of the Asteraceae (*Asteraceae gen. indet.*), cereals (*Poaceae gen. indet.*) and Rosaceae (*Rosaceae gen. indet.*). The spectra show the characteristic features of the palinozone of the end of the subboreal-the beginning of the subatlantic time ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$) of Lake Jarylgach (Subetto et al., 2023). A distinctive feature of palinozone 2 is a noticeable increase in pollen of synanthropic plants: *Plantago spp.*, *Polygonaceae gen. indet.*, *Rumex spp.*, which may indirectly indicate the activation of human activity in the study area during this period.

The data of the geochemical study, including indicators LOI_{550} , LOI_{950} , changes in geochemical indicators of paleoclimate (relative temperature, relative humidity, changes in water level in the reservoir) and anthropogenic activity, allow us to draw conclusions about the conditions of sedimentation of bottom lake sediments in the Holocene.

4. Conclusions

The beginning of sediment formation in Lake Donuzlav occurred in the subboreal period. According to geochemistry, granulometry and spore-pollen analysis, cool and dry climatic conditions are observed at the end of the subboreal period. The further development of the lake is associated with the transition from the subboreal to the subatlantic period ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$). According to geochemical and spore-pollen analysis, the anthropogenic impact on the lake basin is increasing. At the end of the subboreal-the beginning of the subatlantic period ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$), climatic fluctuations from a wetter climate to arid and again to a wetter climatic episode are recorded. This, in turn, influenced the change in the water level in the reservoir and the processes of increasing the salinity of the lake. The upper layer of sediments is formed in the sub-Atlantic period, in a humid climate. The deposits of the cultural layer on the Donuzlav-10 monument were formed with an increase in climate aridization around the 12th-11th century BC. Geochemical studies of sediments at the locations of the Donuzlav 10 livestock enclosure have shown changes in the composition of sediments associated with intensive processing as a result of keeping livestock (Markova et al., 2023). Further formation of

deposits on the monument took place in wetter conditions, close to modern ones, dated by the radiocarbon method around the 2nd century BC-1st century AD.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian National Fund (Project No. 22-18-00065, <https://rscf.ru/project/22-18-00065/> “Cultural and historical processes and paleomedium in the Late Bronze – Early Iron Age of the Northwestern Black Sea region: an interdisciplinary approach”) at the Herzen State Pedagogical University.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Grychuk V.P., Zaklanskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography. Moscow: Geografiz. (in Russian)
- Gerrard A.D. 1984. Soils and landforms. Leningrad: Nedra. (in Russian)
- Keller J.B. 1963. Conductivity of a medium containing a dense array of perfectly conducting spheres or cylinders or nonconducting cylinders. *Journal of Applied Physics* 34(4): 991-993. DOI:[10.1063/1.1729580](https://doi.org/10.1063/1.1729580)
- Kuvshinova O.A., Sardaeva M. N. 2016. The method of operation on the LASKA-1K laser analyzer. Energy-efficient and resource-saving technologies and systems: pp. 268-273. (in Russian)
- Kulkova M.A. 2012. Methods of applied paleolandscape geochemical research. St. Petersburg: Publishing house of RSPU.
- Kurnakov N.S., Kuznetsov V.G., Zens-Litovsky A.I. et al. 1936. Salt lakes of Crimea. Moscow; Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. (in Russian)
- Markova M.A., Kulkova M.A., Kashuba M. T. et al. 2023. Assessment of geoecological factors at the Late Bronze Age settlement Donuzlav-10 with “stone cattle pens” (Northwestern Crimea). LXXVI Herzen readings. Geography: development of science and education: pp. 61-64. (in Russian)
- Nesbitt H. W., Young G. M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299(5885): 715-717. DOI:[10.1038/299715a0](https://doi.org/10.1038/299715a0)
- Subetto D.A., Sapelko T.V., Stolba V.F. et al. 2023. Paleolimnology of the Western Crimea lakes. *Doklady Earth Science* 510(1): 106-111. DOI:[10.31857/S2686739723600157](https://doi.org/10.31857/S2686739723600157)

Палеогеографические условия формирования оз. Донузлав в голоцене (Северо-Западный Крым)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЕрохова М.С.^{1*}, Кулькова М.А.¹, Маркова М.А.¹, Стрельцов М.А.¹,
Кузнецов Д.Д.², Кочубей О.В.³, Кашуба М.Т.⁴¹ РГПУ им. А.И. Герцена, Набережная реки Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия² Институт озероведения РАН, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия³ ВНИГРИ, ул. Фаянсовая, 20, корп.2, лит. А, Санкт-Петербург, 192102, Россия⁴ ИИМК РАН, Дворцовая наб., 18, лит. А, Санкт-Петербург, 191186, Россия

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена реконструкции палеоклиматических условий в голоцене и влияния антропогенного фактора по данным исследования донных отложений озера Донузлав (Северо-Западный Крым). Для этой цели применялись методы геохимического, гранулометрического, спорово-пыльцевого анализов озерных отложений. Отбор отложений проводился с помощью Русского бура. Рентгено-спектральный флуоресцентный анализ и анализ потерь вещества при прокаливании применялись для определения химического состава отложений. Корреляция палеоклиматических данных седиментогенеза озерных отложений с условиями формирования культурного слоя на поселении позднего бронзового века Донузлав 10, позволила установить условия жизнедеятельности людей. Начало формирования отложений в оз. Донузлав относится к суббореальному периоду. Изменение уровня воды в озере связано с изменением климатических факторов, главным образом, изменения влажности климата. В конце суббореального-начале атлантического периода отмечается увеличение антропогенного воздействия на водосборный бассейн. В это время происходит развитие поселений позднего бронзового века с загонами для скота. Аридизация климата в конце суббореального периода привела к уменьшению уровня воды в озере и увеличению солености озера.

Ключевые слова: донные озерные отложения, реконструкция палеоклимата в голоцене, геохимические индикаторы, спорово-пыльцевой анализ, соляные озера, поздний бронзовый век, Северо-Западный Крым

Для цитирования: Ерохова М.С., Кулькова М.А., Маркова М.А., Стрельцов М.А., Кузнецов Д.Д., Кочубей О.В., Кашуба М.Т. Палеогеографические условия формирования оз. Донузлав в голоцене (Северо-Западный Крым) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 328-333. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-328

1. Введение

Озера Крымского полуострова всегда привлекали внимание исследователей как в научном, так и в хозяйственном отношении, уже в 20–30-х годах XX века было положено начало исследованиям соленых озер (Курнаков и др., 1936). Первые данные в области реконструкции условий изоляции озер западной части Крыма были представлены сравнительно недавно. Комплексными исследованиями были изучены донные отложения оз. Сакского и оз. Джарылгач (Subetto et al., 2023).

Озеро Донузлав является вторым по величине и самым глубоким озером Северо-Западного Крыма,

расположенном между Тарханкутским полуостровом на северо-западе и Евпаторийским плато на юго-востоке и относится к Тарханкутской группе минеральных озер. Исходя из значений коэффициента метаморфизации для рапы, оз. Донузлав можно отнести к типичному озеру морского типа, которое отделилось от моря около 4,5 тыс. лет назад (Курнаков и др., 1936). Исследование озерных отложений и реконструкция условий седиментогенеза донных отложений озера является важной задачей не только для установления динамики климатических процессов в голоцене и получения новых данных по оценке антропогенного влияния, но и для установления деталей жизнедеятельности древних

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: slenderina135@gmail.com (М.С. Ерохова)

Поступила: 09 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



сообществ в этом регионе, информация о которых является культурно-исторической ценностью для Крымского полуострова.

2. Материалы и методы

Отбор образцов донных отложений на геохимический, гранулометрический и спорово-пыльцевой анализ производился в открытой части озера с плавучей устойчивой платформы с помощью Русского бура сотрудниками института озероведения РАН (Д.Д. Кузнецов, Т.В. Сапелко). GPS координаты точек отбора образцов: 45.47618°N, 33.25336°E. Литология отложений в керне представлена следующим образом: на глубине 2,03-2,19 м - серая однородная гиттиевая глина; 2,19-2,23 м - черная однородная гиттиевая глина; 2,23-2,74 м - черная однородная глинистая гиттия с крупными фрагментами растительных макроостатков; 2,74-2,87 м - темно-серый плотный слабослоистый глинистый алевролит.

Из керна оз. Донузлав отобрано 40 образцов отложений через 2-3 см. Для проведения геохимического анализа, пробы высушивались при $T = 105^{\circ}\text{C}$, растирались в яшмовой ступке до состояния пудры и запрессовывались в таблетку на подложке из борной кислоты. Анализ проводился с помощью рентгено-флуоресцентного волно-дисперсионного спектрометра «Спектроскан МАКС-GV». Определены концентрации 32 породообразующих оксидов и микроэлементов. Рассчитаны геохимические индикаторы изменения условий седиментогенеза: $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (Джеррард, 1984), Rb/Sr , $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (Nesbitt and Young, 1982), SiO_2 биогенный (Keller, 1963), CaO/MgO , P_2O_5 антропогенный (Кулькова, 2012). Определены потери при прокаливании (LOI) при 550°C и 950°C , показывающие содержание органической и карбонатно-сульфатной составляющих.

Для установления гранулометрического состава пробы подготовлены и проанализированы на лазерном анализаторе частиц «ЛАСКА-ТД» с помощью стандартной методики (Кувшинова и Сардаева, 2016).

Спорово-пыльцевой анализ донных отложений был выполнен О.В. Кочубей, сотрудником лаборатории палинологических исследований ВНИГРИ по стандартной методике (Гричук и Заклинская, 1948).

Для реконструкции палеогеографических условий на археологическом памятнике позднего бронзового века Донузла-10 были отобраны образцы отложений из разреза стенки шурфа на поселении, расположенном на берегу оз. Донузлав. Географические координаты центральной части поселения: $45^{\circ}26.762'\text{N}$, $33^{\circ}14.856'\text{E}$. Отложения представлены сверху-вниз: 0-7 см - дерновый слой; 7-14 см - отложения плотной коричневой супеси; 14-35 см светло-коричневый суглинок; 35-40 см - карбонатный щебень. Для реконструкции палеоклимата применялись геохимический и гранулометрический анализы отложений. Радиоуглеродное

определение возраста отложений культурного слоя на гл.14-35 см проводилось по вытяжкам гуминовых кислот из почв в радиоуглеродной лаборатории РГПУ им. А.И. Герцена по традиционной радиометрической методике с использованием сцинтилляционного счетчика «Quantulus-1220».

3. Результаты и обсуждение

В ходе проведения спорово-пыльцевого анализа было выделено две палинозоны. Палинозона 1 (гл. 2,77-2,85 м) характеризуется преобладанием пыльцы травянистых растений, среди которых господствуют представители маревых (*Chenopodiaceae* gen. indet.). Похожие по составу палинозоны прослеживаются в суббореальных отложениях оз. Джарылгач (Subetto et al., 2023).

В палиносpectрах палинозоны 2 (гл. 2,29-2,68 м) по-прежнему преобладают представители травяно-кустарничковой группы, среди которых уверенно господствуют марево-полынные сообщества (суммарно от 34 до 52%). Субдоминантами выступают представители сложноцветных (*Asteraceae* gen. indet.), злаковых (*Poaceae* gen. indet.) и розоцветных (*Rosaceae* gen. indet.). В спектрах прослеживаются характерные особенности палинозон конца суббореального-начала субатлантического времени ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$) оз. Джарылгач (Subetto et al., 2023). Отличительной особенностью палинозоны 2 является заметное увеличение пыльцы синантропных растений: *Plantago* spp., *Polygonaceae* gen. indet., *Rumex* spp., что может косвенно свидетельствовать об активизации хозяйственной деятельности человека на территории исследования в данный период.

Данные геохимического исследования, включающие показатели LOI_{550} , LOI_{950} , изменения геохимических индикаторов палеоклимата (относительной температуры, относительной влажности, изменения уровня воды в водоеме) и антропогенной активности, позволяют сделать выводы об условиях седиментогенеза донных озерных отложений в голоцене.

4. Заключение

Начало формирования отложений в озере Донузлав происходило в суббореальном периоде. По данным геохимии, гранулометрии и спорово-пыльцевого анализа в конце суббореального периода отмечаются прохладные и сухие климатические условия. Дальнейшее развитие озера связано с переходом от суббореального к субатлантическому периоду ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$). По данным геохимического и спорово-пыльцевого анализа увеличивается антропогенное влияние на озерный бассейн. В конце суббореального-начале субатлантического периода ($\text{SB}_3\text{-SA}_1$) фиксируются климатические колебания от более влажного климата к засушливому и снова к более влажному климатическому эпизоду. Это в свою очередь повлияло на изменение уровня воды в водоеме и процессы увеличения

солености озера. Верхний слой отложений формируется в субатлантическом периоде, в условиях влажного климата. Отложения культурного слоя на памятнике Донузлав-10 были сформированы при увеличении аридизации климата около 12-11 в. до н.э. Геохимические исследования отложений в местах расположения загона Донузлав 10 показали изменения состава отложений, связанного с интенсивной его переработкой в результате содержания домашних животных (Маркова и др., 2023). Дальнейшее формирование отложений на памятнике происходило в более влажных, приближенных к современным, условиях, датированных радиоуглеродным методом около 2 в. до н.э.-1 в. н.э.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №22-18-00065, <https://rscf.ru/project/22-18-00065/> «Культурно-исторические процессы и палеосреда в позднем бронзовом – раннем железном веке Северо-Западного Причерноморья: междисциплинарный подход») в РГПУ им. А. И. Герцена.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гричук В. П., Заклинская Е. Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: Географгиз.

Джеррард А. Д. 1984. Почвы и формы рельефа. Ленинград: Недра.

Кувшинова О. А., Сардаева М. Н. 2016. Методика работы на лазерном анализаторе «ЛАСКА-1К». Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: 268-273.

Кулькова М. А. 2012. Методы прикладных палеолендшафтных геохимических исследований. Санкт-Петербург: Изд-во РГПУ.

Курнаков Н. С., Кузнецов В. Г., Дзенс-Литовский А. И. и др. 1936. Соляные озера Крыма. Москва; Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР.

Маркова М. А., Кулькова М. А., Кашуба М. Т. и др. 2023. Оценка геоэкологических факторов на поселении позднего бронзового века Донузлав-10 с «каменными загонами для скота» (Северо-Западный Крым). LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: 61-64.

Keller J.B. 1963. Conductivity of a medium containing a dense array of perfectly conducting spheres or cylinders or nonconducting cylinders. *Journal of Applied Physics* 34(4): 991-993. DOI:[10.1063/1.1729580](https://doi.org/10.1063/1.1729580)

Nesbitt H. W., Young G. M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299(5885): 715-717. DOI:[10.1038/299715a0](https://doi.org/10.1038/299715a0)

Subetto D.A., Sapelko T.V., Stolba V.F. et al. 2023. Paleolimnology of the Western Crimea lakes. *Doklady Earth Science* 510(1): 106-111. DOI:[10.31857/S2686739723600157](https://doi.org/10.31857/S2686739723600157)

Late Pleistocene and Holocene sediments of Lake Chukhlomskoye



Filippova K.G.^{1*}, Konstantinov E.A.¹, Zakharov A.L.¹, Kuzmenkova N.V.^{1,2}

¹Institute of Geography RAS, 29/4 Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department, Radiochemistry Division, 1/10 Kolmogorov str., Moscow, 119234, Russia

ABSTRACT. The paper discusses the structure of the bottom sediments of Lake Chukhlomskoye (Kostroma region, Russia). The results of complex lithological analysis and ¹⁴C AMS dating (TOC) of the sediments revealed in two boreholes located in different geomorphological positions of the bottom relief allowed to reconstruct stages and conditions of sedimentation in the lake. Mass accumulation rate (MAR) was calculated. High values of MAR correspond to 25.4–17.5 cal. ka BP (up to 0.192 g/cm² per year), a sharp decrease of MAR corresponds to 17.9–16.7 cal ka BP, and another stage of sediment influx occurred in Younger Dryas. Holocene MAR is low (0.001–0.053 g/cm² per year).

Keywords: lake deposits, paleolimnology, radiocarbon dating, accumulation rate, paleogeographic reconstructions

For citation: Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L., Kuzmenkova N.V. Late Pleistocene and Holocene sediments of Lake Chukhlomskoye // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 334-339. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-334

1. Introduction

Lake Chukhlomskoe is situated in the Kostroma-Volga river basin, on the elevated Galich-Chukhloma Upland (the watershed of Kostroma and Unzha rivers (150–293 m a.s.l.), in the northern part of the Kostroma region). The area is located south of the boundary of the last Valdai glaciation (Map of Quaternary..., 1972) which suggests the lake's sediments to be the key paleo-archive for the region.

Lake Chukhlomskoe has a catchment of about 270 km², the lake's area is 49.15 km² (including the bay to the dam, built in 1963 on the outflowing Veksa River), and the volume of water is 0.1084 km³. The maximum depth in the hollows in the central part (and for the entire lake) reaches 5.4 m. The average depth of the lake, determined by a set of measurement points, is 2.4 m (and V/S depth is 2.2 m) (Filippova et al., 2023). All tributaries are small rivers, and the lake's coast is waterlogged.

The lake's geomorphological position and its basin's morphometric characteristics create the prerequisites for stable and continuous sedimentation.

Lithological analyses and detailed radiocarbon dating allow us to calculate sediment accumulation rates, which is important for reconstructions of hydro-

logical processes and landscape-climatic conditions changes in the Late Pleistocene and Holocene.

Calculations of linear sedimentation rate (LSR) and mass accumulation rate (MAR, which is more objective criteria of the sedimentation process, because it considers the density of the sediment) in lakes are widely used for paleogeographic reconstructions (Svendsen et al., 2018; Zander et al., 2021). In the centre of the East European Plain, lake sediments of the Last Glacial Maximum were studied only in Lake Galichskoe (Velichko et al., 2001), but without any LSR or MAR calculations.

2. Materials and methods

Two winter (drilling the bottom sediments from ice using the Livingston Piston Sampler) and one summer (bathymetric survey) fieldwork expeditions were completed in 2021–2022.

Borehole Chu13A was drilled in the deep central part of Lake Chukhlomskoye (in a hollow), at a depth of 4.0 m (the thickness of the collected core is 7.45 m) (Filippova et al., 2023) and borehole Chu22-39A was drilled on a background bottom surface at the depth of 2.5 m (the thickness of the collected core is 13.9 m).

*Corresponding author.

E-mail address: xenia.filippova@igras.ru (K.G. Filippova)

Received: June 04, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Complex lithological analysis including loss on ignition (550 and 950°C), grain size analysis (using Malvern Mastersizer 3000 laser diffractometer), magnetic susceptibility (using ZH Instruments SM 150 L device) and volumetric density measurements of the samples was made in the Laboratory of Environmental Palearchives of the Institute of Geography RAS.

The content of ^{137}Cs radioactive isotope of the upper weakly consolidated layer of silt for Chu13A core was measured at the Radiochemistry Division of the Chemistry Department of Moscow State University.

^{14}C AMS dating on total organic carbon (TOC) was made for both cores at the Center for Collective Use “Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy” of the Institute of Geography RAS and at the Center for Isotope Research of the University of Georgia (USA).

Eight AMS dates for Chu13A core and ten AMS dates for Chu22-39A core allowed to calculate age-depth models using rBacon package for R (Blaauw and Christen, 2011) and then mass accumulation rates (MAR, g/cm^2 per year) (Zander et al., 2021).

3. Results

Complex lithological analysis revealed a similar structure of the Lake Chukhlomskoye sediment in both cores. The bottom sediments are composed mainly of silt (the content of the silt fraction reaches 70–80%). The upper layer of sediment is weakly consolidated organic silt, which is underlain by organomineral silt (organic matter content is 40–60%). Below lies a layer of carbonate silt (the CaCO_3 content in this layer reaches 60%), underlain by mineral silt, which is sandy in the upper part of the layer. The boundary between the carbonate silt layer and the upper laid organomineral silt layer is abrupt, which suggests a hiatus in sedimentation. When comparing the structure of sediments in cores, it was revealed that in the Chu13A core located in the hollow, the thickness of the organomineral silt was significantly reduced, which suggests the erosive origin of this bottom landform.

The results of ^{137}Cs radioactive isotope measurements for the upper part of Chu13A core revealed that there is a maximum of its content in the sediments corresponding to 1986 (Filippova et al., 2023), which was applied for age-depth model calculation.

The analysis of the proportion of mineral matter, organic matter and CaCO_3 content allows us to identify three stages of sedimentation. The mineral silt layer with a low content of organic and carbonate matter corresponds to 25–12 cal. yr BP, a layer of carbonate silt accumulated 12–11 cal yr BP, and organomineral silt began to accumulate in the Holocene. The hiatuses were found by sharp boundaries between carbonate and organomineral silt and the age gap.

MAR calculation revealed stages of sedimentation. High values of MAR calculated for Chu22-39A core relate to 25.0–23.0 cal ka BP (0.110–0.182 g/cm^2 per year) with the peak value of 0.175–0.182 g/cm^2 per year at 24.5 cal ka BP. The next stage with high

MAR values was noted at 21.5–17.5 cal ka BP (0.100–0.192 g/cm^2 per year) with the highest peak for the entire paleoarchive reaching 0.192 g/cm^2 per year at 18.8 cal ka BP. Then at 17.5–16.7 cal ka BP there was a sharp decrease in sediment accumulation from 0.134 to 0.012 g/cm^2 per year. And during 12.7–11.0 cal ka BP there was another stage of sediment influx with MAR values of 0.012–0.018 g/cm^2 per year. A hiatus in sedimentation was noted at 11.0–7.0 cal ka BP according to the age-depth model. After the hiatus, a low sedimentation rate (0.001–0.007 g/cm^2 per year) has been typical for Chu22-39A core sediments and persists to the present.

High values of MAR calculated for Chu13A core relate to 25.4–24.1 cal ka BP (0.080–0.095 g/cm^2 per year) with the peak value of 0.095 g/cm^2 per year at 25.4 cal ka BP. The next stage with high MAR values was noted at 23.0–21.0 cal ka BP (0.093–0.117 g/cm^2 per year) with the highest peak for the entire paleoarchive reaching 0.117 g/cm^2 per year at 22.9 cal ka BP. At 18.2 cal ka BP MAR is 0.061 g/cm^2 per year and after that we also see a sharp decrease in sediment accumulation from 0.060 to 0.016 g/cm^2 per year which occurred 17.9–16.9 cal ka BP. During 12.7–11.0 cal ka BP the next stage of sediment influx was noted with MAR values of 0.009–0.012 g/cm^2 per year. A hiatus in sedimentation was noted at 11.0–5.5 cal ka BP. In Chu13A core there was another hiatus from 4.8 cal ka BP to 50–60 years ago. For the last 50–60 years MAR in the hollow is 0.011–0.053 g/cm^2 per year.

4. Discussion and conclusions

Svendsen et al. (2018) at the Polar Urals Mountains lake Bolshoye Shchuchye obtained that the sedimentation rates in the lake remained high and stable in the time interval 23.8–18.7 cal ka BP, after which it gradually decreased until 11.6 cal ka BP. They postulate that sediment influx before 18.7 cal ka BP is due to abundant sediment supply from meltwater rivers draining glaciers within the catchment.

Our study area is located south of the boundary of the last glaciation, so we assume the following factors caused high sediment influx: permafrost, increased river runoff and fluctuations in the composition of plant communities (Velichko et al., 2001). We suggest that permafrost melted ~ 17.9–16.7 cal ka BP when MAR decreased sharply. The next sediment influx occurred 12.7–11.0 cal ka BP corresponding to Younger Dryas cooling which could cause the return of the permafrost (but MAR is ten times lower than in LGM) and forest landscape degradation. The Early Holocene hiatus could mark the low level of the lake drained by the Veksa River. Mid to Late Holocene hiatus in Chu13A core marks the erosional process in the hollow during this period. We assume that the erosion in a hollow stopped after the dam on the Veksa River was built in 1963 (Filippova et al., 2023). Holocene MAR is low due to the slow erosional process in the lake’s catchment caused by forest distribution and waterlogging of the shores.

Acknowledgements

The work was funded by the Russian Science Foundation project No. 23-77-10063, “Reconstruction of natural events based on high-resolution sedimentation paleoarchives from the center of the East European Plain over the past 25 thousand years.”

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)

Filippova K.G., Konstantinov E.A., Zakharov A.L. et al. 2023. Structure and origin of the bottom relief of Lake Chukhlomskoe (Kostroma Region). *Geomorfologiya i Paleogeografiya* 54(4): 145–162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047) (in Russian)

Map of Quaternary deposits: O-38-VII. 1972. In: Borozdina Z.I. (Ed.), *Geological map of the USSR. Map of*

Quaternary deposits. Mezenskaya series. Scale: 1:200000. Moscow: Vsesoyuzny Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR. (in Russian)

Svendsen J.I., Færseth L.M.B., Gyllencreutz R. et al. 2018. Glacial and environmental changes over the last 60 000 years in the Polar Ural Mountains, Arctic Russia, inferred from a high-resolution lake record and other observations from adjacent areas. *Boreas* 48(2): 407–431. DOI: [10.1111/bor.12356](https://doi.org/10.1111/bor.12356)

Velichko A.A., Kremenetsky K.V., Negendank J. et al. 2001. Late Quaternary history of vegetation of the Kostroma Volga region according to palynological studies of Lake Galichskoye bottom sediments (Pozdnechetvertichnaya istoriya rastitelnosti Kostromskogo Zavolzhya po dannym palinologicheskogo izucheniya donnikh osadkov Galichskogo ozero). *Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period (Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda)* 64: 5–21. (in Russian)

Zander P., Żarczyński M., Vogel H. et al. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of The Total Environment* 755(2): 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)

Донные отложения позднего плейстоцена и голоцена Чухломского озера



Филиппова К.Г.^{1*}, Константинов Е.А.¹, Захаров А.Л.¹, Кузьменкова Н.В.^{1,2}

¹Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Химический факультет, Кафедра радиохимии, ул. Колмогорова, 1с10, Москва, 119234, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассматривается строение донных отложений Чухломского озера (Костромская область, Россия). Результаты комплексного литологического анализа и радиоуглеродного датирования методом AMS двух колонок отложений, расположенных на разных геоморфологических позициях рельефа дна, позволили реконструировать этапы и условия осадконакопления в озере. Рассчитан прирост массы осадка (MAR – mass accumulation rate). Высокие значения MAR отмечаются 25.4–17.5 тыс. кал.л.н. (до 0.192 г/см² в год), резкое снижение MAR соответствует 17.9–16.7 тыс. кал.л.н., а следующий этап повышенного притока наносов в озеро наблюдается в позднем дриасе. В голоцене MAR низкий (0.001–0.053 г/см² в год).

Ключевые слова: озерные отложения, палеолимнология, радиоуглеродное датирование, скорость аккумуляции наносов, палеогеографические реконструкции

Для цитирования: Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л., Кузьменкова Н.В. Донные отложения позднего плейстоцена и голоцена Чухломского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 334-339. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-334

1. Введение

Чухломское озеро расположено в Костромском Заволжье, на возвышенной Галичско-Чухломской гряде (водораздел рек Костромы и Унжи, 150–293 м н.у.м.), в северной части Костромской области. Территория находится к югу от границы последнего Валдайского оледенения (Геологическая карта..., 1972), что позволяет рассматривать донные отложения озера в качестве палеоархива регионального значения.

Площадь водосбора Чухломского озера составляет около 270 км², площадь озера – 49.15 км² (включая залив до плотины, построенной в 1963 г. на вытекающей реке Вексе), объем воды – 0.1084 км³. Максимальная глубина в ложбинах в центральной части (и для всего озера) достигает 5.4 м. Средняя глубина озера, определенная по данным эхолотирования, составляет 2.4 м (гидрологическая глубина V/S – 2.2 м) (Филиппова и др., 2023). Притоками являются небольшие реки, берега озера заболочены.

Геоморфологическое положение озера и морфометрические характеристики его котловины создают предпосылки для стабильного и непрерывного осадконакопления.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [Xenia.filippova@igras.ru](mailto: Xenia.filippova@igras.ru) (К.Г. Филиппова)

Поступила: 04 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

Литологические анализы и детальное радиоуглеродное датирование отложений позволяют рассчитать скорость осадконакопления, что важно для реконструкции гидрологических процессов и изменений ландшафтно-климатических условий в позднем плейстоцене и голоцене.

Оценка скоростей осадконакопления в озерах широко используется для палеогеографических реконструкций (Svendsen et al., 2018; Zander et al., 2021). Рассчитывается как линейная скорость осадконакопления, так и прирост массы осадка – MAR (mass accumulation rate). Этот показатель процесса осадконакопления является более объективным, так как учитывает плотность осадка. В центре Восточно-Европейской равнины озерные отложения последнего ледникового максимума вскрыты только в Галичском озере (Величко и др., 2001), но расчеты скоростей осадконакопления и прироста массы осадка для него не производились.

2. Материалы и методы исследования

В 2021–2022 гг. были проведены две зимние (бурение донных отложений со льда с помощью поршневого бура Ливингстона) и одна летняя (батиметрическая съемка) полевые экспедиции.

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Скважина Chu13A была пробурена в глубокой центральной части Чухломского озера (в ложбине), на глубине 4.0 м (получен керн длиной 7.45 м) (Филиппова и др., 2023), а скважина Chu22-39A – на фоновой поверхности дна на глубине 2.5 м (длина керна 13.9 м).

Комплексный литологический анализ, включающий определение потерь при прокаливании (550 и 950°C), гранулометрический анализ (при помощи лазерного дифрактометра Malvern Mastersizer 3000), измерение магнитной восприимчивости (на приборе ZH Instruments SM 150 L) и объемной плотности осадка, был выполнен в Лаборатории палеоархивов природной среды Института географии РАН.

Содержание радиоактивного изотопа ^{137}Cs в верхнем слое слабоконсолидированного ила колонки Chu13A измерено на кафедре радиохимии химического факультета МГУ.

Радиоуглеродное датирование методом ускорительной масс-спектрометрии по общему углероду выполнено для обоих кернов в Центре коллективного пользования «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН и в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США).

Восемь AMS дат для керна Chu13A и десять AMS дат для керна Chu22-39A позволили построить возрастную модель осадконакопления при помощи пакета *gWason* для среды программирования R (Blaauw and Christen, 2011), а затем рассчитать прирост массы осадка (MAR, г/см² в год) (Zander et al., 2021).

3. Результаты исследования

Комплексный литологический анализ выявил сходное строение донных отложений Чухломского озера в обоих кернах. Донные отложения представлены преимущественно илами (содержание илистой фракции достигает 70–80%). Верхний слой осадка – слабо консолидированный органический ил, подстилаемый органоминеральным илом (содержание органического вещества 40–60%). Ниже залегает слой карбонатного ила (содержание CaCO_3 в этом слое достигает 60%), подстилаемый минеральным илом, который опесчанен в верхней части слоя. Граница между слоем карбонатного ила и вышележащим слоем органоминерального ила резкая, что свидетельствует о перерыве в осадконакоплении. При сравнении последовательностей отложений в двух кернах было выявлено, что в колонке Chu13A, расположенной в ложбине, мощность органоминерального ила значительно сокращена, что свидетельствует об эрозионном происхождении этой формы донного рельефа.

Для верхней части керна Chu13A измерено содержание радиоактивного изотопа ^{137}Cs и обнаружен пик содержания, соответствующий 1986 г. (Филиппова и др., 2023). Датировка использована при построении возрастной модели.

Анализ соотношения минерального, органи-

ческого вещества и содержания CaCO_3 позволяет выделить три стадии осадконакопления. Слой минерального ила с низким содержанием органического и карбонатного вещества соответствует 25–12 тыс. кал.л.н., слой карбонатного ила накапливался 12–11 тыс. кал.л.н., а органоминеральный ил начал накапливаться в голоцене. Перерывы в осадконакоплении отмечены по резким границам между слоями карбонатного и органоминерального илов и скачку возраста.

Расчет MAR выявил этапы осадконакопления в Чухломском озере. Высокие значения MAR, рассчитанные для керна Chu22-39A, отмечаются 25.0–23.0 тыс. кал.л.н. (0.110–0.182 г/см² в год) с пиковым значением 24.5 тыс. кал.л.н. (0.175–0.182 г/см² в год). Следующий этап с высокими значениями MAR отмечается 21.5–17.5 тыс. кал.л.н. (0.100–0.192 г/см² в год) с максимумом для всей колонки, достигшим 0.192 г/см² в год, 18.8 тыс. кал.л.н. Затем 17.5–16.7 тыс. кал.л.н. произошло резкое снижение прироста массы осадка с 0.134 до 0.012 г/см² в год. А в период 12.7–11.0 тыс. кал.л.н. принос наносов снова вырос до 0.012–0.018 г/см² в год. Перерыв в осадконакоплении произошел 11.0–7.0 тыс. кал.л.н., согласно модели осадконакопления. Для второй половины голоцена получены низкие значения прироста массы осадка (0.001–0.007 г/см² в год).

Высокие значения MAR, рассчитанные для керна Chu13A, отмечаются 25.4–24.1 тыс. кал.л.н. (0.080–0.095 г/см² в год) с пиковым значением 0.095 г/см² в год 25.4 тыс. кал.л.н. Следующий этап с высокими значениями MAR отмечается 23.0–21.0 тыс. кал.л.н. (0.093–0.117 г/см² в год) с максимумом для всей колонки, достигшим 0.117 г/см² в год, 22.9 тыс. кал.л.н. 18.2 тыс. кал.л.н. MAR составляет 0.061 г/см² в год, после чего так же наблюдается резкое снижение прироста массы осадка с 0.060 до 0.016 г/см² в год, которое произошло 17.9–16.9 тыс. кал.л.н. В период 12.7–11.0 тыс. кал.л.н. принос наносов вырос до 0.009–0.012 г/см² в год. Перерыв в осадконакоплении отмечается 11.0–5.5 тыс. кал.л.н. В керне Chu13A наблюдается второй перерыв в осадконакоплении с 4.8 тыс. кал.л.н. до 50–60 лет назад. За последние 50–60 лет значения прироста массы осадка в ложбине составляют 0.011–0.053 г/см² в год.

4. Обсуждение результатов и выводы

Svendsen et al. (2018) на озере Большое Щучье в горах Полярного Урала получили данные о том, что скорость седиментации в озере оставалась высокой и стабильной 23.8–18.7 тыс. кал.л.н., после чего она постепенно снижалась вплоть до 11.6 тыс. кал.л.н. Они предположили, что приток осадочного материала ранее 18.7 тыс. кал.л.н. связан с обильным поступлением осадка из талых вод рек, дренирующих ледники в пределах водосбора.

Наш объект исследования расположен к югу от границы последнего оледенения, поэтому мы предполагаем влияние следующих факторов на оби-

лие поступающего материала в озеро: наличие многолетней мерзлоты, увеличенные объемы речного стока и флуктуации состава растительных сообществ (Величко и др., 2001). Предположительно, мерзлота растаяла ~17.9–16.7 тыс. кал.л.н. (резкое снижение значений MAR). Следующий этап повышенных значений MAR произошел 12.7–11.0 тыс. кал.л.н., что соответствует похолоданию позднего дриаса, которое могло спровоцировать появление многолетней мерзлоты (но MAR в десять раз ниже, чем во время последнего ледникового максимума) и сократить количество древесной растительности. Перерыв в осадконакоплении в раннем голоцене может маркировать низкий уровень озера, дренируемого рекой Вексой. Средне-позднеголоценовый перерыв в осадконакоплении в керне Chu13A указывает на эрозионный процесс в центральной части озера, в результате чего были сформированы ложбины. Мы предполагаем, что эрозия в ложбинах прекратилась после строительства плотины на реке Вексе в 1963 году (Филиппова и др., 2023). В голоцене прирост массы осадка низкий, что говорит о слабой эрозии на водосборе озера благодаря распространению лесной растительности и заболачиванию берегов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №23–77–10063 «Реконструкция природных событий по высокоразрешающим седиментационным палеоархивам центра Восточно-Европейской равнины за последние 25 тысяч лет».

Конфликт интересов

У авторов отсутствует конфликт интересов.

Список литературы

Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й. и др. 2001. Позднечетвертичная история растительности Костромского Заволжья по данным палинологического изучения донных осадков Галичского озера. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 64: 5–21.

Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, лист О–38–VII, масштаб: 1:200000. 1972. Под ред. З.И. Бороздиной. М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.

Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Захаров А.Л. и др. 2023. Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область). Геоморфология и палеогеография 54(4): 145–162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047)

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)

Svendsen J.I., Færseth L.M.B., Gyllencreutz R. et al. 2018. Glacial and environmental changes over the last 60 000 years in the Polar Ural Mountains, Arctic Russia, inferred from a high-resolution lake record and other observations from adjacent areas. *Boreas* 48(2): 407–431. DOI: [10.1111/bor.12356](https://doi.org/10.1111/bor.12356)

Zander P., Żarczyński M., Vogel H. et al. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of The Total Environment* 755(2): 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)

Palynology of Lake Motykino in the Holocene (Vologda region, Northwestern part of European Russia)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYKamygina A.V.^{1,2*}, Yershova E.G.^{1,3}¹ Moscow State University named after Lomonosov, Kolmogorova Str., 1, Moscow, 119991, Russia² Cherepovets State University, Lunacharsky Ave., 5, Cherepovets, 162600, Russia³ University of Wisconsin-Madison, 161 Bascom Hall 500 Lincoln Drive Madison, WI 53706, USA

ABSTRACT. This work is dedicated to studying the dynamics of vegetation and natural-climatic conditions in the Mologo-Sheksninskaya lowland in the north of the East European Plain during the Holocene. Lake Motykino, located in the Darwin Nature Biosphere Reserve, was chosen as the research object due to its unique location and preservation of relic lake deposits. Radiocarbon dating and pollen analysis were conducted. The research results are presented in the form of a lithological description of the sediment column, stratigraphic analysis, and a pollen diagram divided into five local pollen zones, reflecting the succession of plant communities from periglacial landscapes in the Late Glacial to the formation of boreal forests in the Holocene. Analysis of pollen spectra allowed for the identification of key periods in the vegetation history of the region, from 13,300 cal BP to 400 cal BP, and to track changes in vegetation composition and peat formation processes.

Keywords: vegetation dynamics, Holocene, pollen analysis, North-Western Russia, Eastern Europe

For citation: Kamygina A.V., Yershova E.G. Palynology of Lake Motykino in the Holocene (Vologda region, Northwestern part of European Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 340-345. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-340

1. Introduction

The Mologo-Sheksninskaya lowland (MSL) holds significant importance for studying and reconstructing the dynamics of vegetation and climatic conditions during the Late Glacial period and the Holocene (Sadokov et al., 2022). However, to date, the chronology of changes in the central part of the MSL, as well as the formation of glacial deposits in this region, remain insufficiently studied (Sapelko and Sadokov, 2022). Therefore, this area represents a great interest for further research in this direction.

Lake Motykino (N 58.550895°, E 37.613226°) is located in the north of the East European Plain (Vologda region) at an altitude of 104 m above sea level. It is situated in the boreal climatic zone of the East European taiga. The lake has an area of 0.023 km² and an average depth of 3 m, making it one of the small relic lakes that have been preserved since the deglaciation of the last glaciation cover (Sadokov et al., 2022). The vegetation is dominated by spruce and pine forests with the presence of deciduous species. Among the main tree species are *Picea abies* (L.) H.Karst, *Pinus sylvestris* L.,

Betula pendula Roth, *Betula pubescens* Ehrh., and *Populus tremula* L. Additionally, species such as *Alnus incana* (L.), *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., and various species of the genus *Salix* can be found here. The lake is located within the protected natural area of the Darwin Nature Biosphere Reserve, where more than 80% of the territory is covered by sphagnum upland bogs and marshy forests, with around two dozen small lakes located on the marshy plains (Kuznetsov et al., 2006). The vegetation within the bog is dominated by *Pinus sylvestris* L. and heath shrubs, with the participation of the *Carex* genus. The nearest modern settlement (the village of Borok) is located 4 km away from the lake. It should be noted that Lake Motykino has not been studied from a paleoecological perspective before.

2. Materials and Methods

Lake sediment cores were extracted in March 2022 using a Russian corer (with a diameter of 5 cm and a sampling length of 1 m) from the ice surface. The total thickness of the recovered sediments was 236 cm (three cores). Lithological descriptions and photo-

*Corresponding author.

E-mail address: camygina@yandex.ru (A.V. Kamygina)

Received: June 01, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



graphic documentation of the cores were carried out immediately after their extraction. The chronology is based on 5 dates obtained at the AMS laboratory of A.E. Lalonde at the University of Ottawa. Additionally, a sediment accumulation rate model was created in OxCal (Reimer et al., 2020), which showed that sedimentation occurred uniformly at an average rate of approximately 55 years/cm. This model allowed for the determination of temporal intervals for the identified pollen zones.

3. Results and Discussion

In field conditions, 236 cm of sediment was collected and described. The lower part of the core (236-189 cm) consisted of weakly mineralized sapropelic peat of medium decomposition degree. From a depth of 220 cm to 190 cm, rhythmic color layering was observed, distinguished based on differences in density, botanical composition, and mineralization. After a thin layer from 190-189 cm, represented by greenish organogenic aleuropelit, the sediments up to their upper boundary (189-0 cm) consisted of viscous, loosely compacted silts with a large amount of plant macroremains. The underlying rocks were not penetrated.

Based on stratigraphic cluster analysis (CONISS), the pollen diagram (Figure 1) was divided into 5 local pollen zones (LPAZs 1-5).

LPZ 1 (13,300-11,500 cal BP): The spectra significantly differ from other zones in the column and are characterized by the predominance of Poaceae pollen, including > 40 μm, *Artemisia* sp., and *Amaranthaceae*. The first half of the zone is marked by a rapid increase in *Picea* sp. pollen. The obtained spectra reflect the periglacial vegetation of the late Pleistocene - tundra-steppe and gradually forming spruce forests.

LPZ 2 (11,500-8,200 cal BP): The spectra are characterized by the predominance of *Betula* sp. pollen. The proportion of *Picea* sp. pollen rapidly decreases, while the amount of *Pinus* sp. pollen increases. The proportion of Poaceae decreases. *Nymphaea* sp. pollen appears, and the proportion of Cyperaceae increases, indicating the beginning of the infilling of an open water body. The composition of the spectra reflects the formation of boreal forests dominated by pine and birch in the early Holocene.

LPZ 3 (8,200-5,500 cal BP): The spectra are characterized by a significant increase in the proportion of *Alnus* sp., *Quercus* sp., *Ulmus* sp., and *Tilia* sp. The amount of *Betula* sp. pollen decreases. The appearance of the indicator of peat formation, *Sphagnum* sp., is observed. The spectra reflect the Holocene climatic optimum, during which the southern taiga with a noticeable presence of broad-leaved species was formed.

LPZ 4 (5,500-2,500 cal BP): The presence of all woody taxa in the spectra fluctuates within the zone. The amount of *Betula* sp. pollen continues to decrease, but the proportion of *Pinus* sp. and *Picea* sp. increases. There is a gradual increase in the number of *Sphagnum* spores. The spectra reflect an increase in coniferous species in the forests against a backdrop of gradual cooling.

LPZ 5 (2,500-400 cal BP): An increase in *Pinus* sp., *Artemisia* sp., and Poaceae pollen, including large pollen grains (> 40 μm), correlates with a decrease in the proportion of broad-leaved tree pollen and *Picea* sp. throughout the zone. The number of *Sphagnum* spores continues to rise. The spectra indicate the formation of modern sub-boreal spruce forests, with the appearance of anthropogenic indicators suggesting human exploitation of the area.

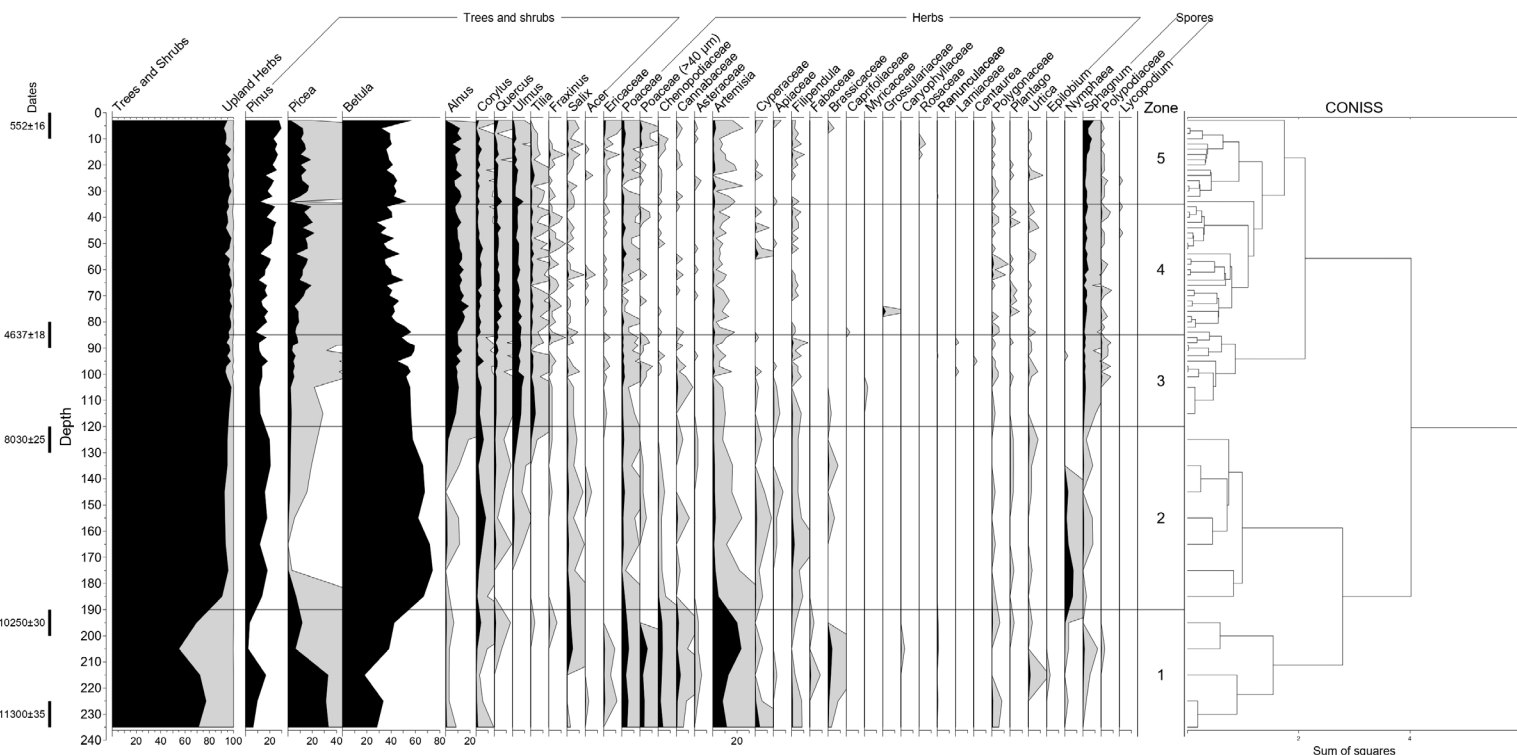


Fig.1. Pollen diagram of Lake Motyokino sediments (Vologda region).

4. Conclusions

Analysis of the sediments of Lake Motykino, including lithological description, radiocarbon dating, spore-pollen analysis, and assessment of sedimentation rate and uniformity, allowed to identify 5 local pollen zones reflecting the main stages of vegetation development, and to reconstruct the history of vegetation dynamics in the region over the past 13,300 years: from tundra-steppe periglacial landscapes of the late Pleistocene to modern boreal forests of the Holocene.

The results of the study make a significant contribution to understanding the history of past ecosystem development in the Mologo-Sheksninskaya lowland and provide a basis for further research on changes in natural conditions in the region.

Acknowledgements

The research was conducted within the framework of the Russian Science Foundation project 19-14-00102 and the research program in the Darwin Reserve No. 122061700062-1. The authors express their gratitude to Ph.D. D.O. Sadokov.

Conflict of Interest

The author(s) declare no potential conflict of interest.

References

- Kuznetsov A.V., Zelenetsky N.M., Rybnikova I.A. et al. 2006. Essay on the natural conditions of the Darwin Reserve. Proceedings of the Darwin State Nature Reserve: 5-21.
- Sapelko T.V., Sadokov D.O. 2022. Palynology of lakes in the Mologo-Sheksninskaya lowland. Current issues in modern palynology: Materials of the XV All-Russian Palynological Conference: 316-320.
- Sadokov D.O., Sapelko T.V., Fedorov G.B. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study. *Limnology and Freshwater Biology*: 1562-1564. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562)
- Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*.

Палинология озера Мотыкино в голоцене (Вологодская область, Северо-Запад европейской части России)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYКамыгина А.В.^{1,2*}, Ершова Е.Г.^{1,3}¹ ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. Ломоносова, ул. Колмогорова, 1, Москва, 119991, Россия² ФГБОУ ВО Череповецкий государственный университет, пр. Луначарского, 5, Череповец, 162600, Россия³ University of Wisconsin-Madison, 161 Bascom Hall 500 Lincoln Drive Madison, WI 53706, USA

АННОТАЦИЯ. Данная работа посвящена изучению динамики растительности и природно-климатических условий в Молого-Шекснинской низменности на севере Восточно-Европейской равнины в голоцене. Озеро Мотыкино, расположенное в Дарвинском природном биосферном заповеднике, было выбрано в качестве объекта исследования из-за его уникального расположения и сохранности реликтовых озерных отложений. Были получены радиоуглеродные датировки и проведен спорово-пыльцевой анализ. Результаты исследования представлены в виде литологического описания колонки отложений, стратиграфического анализа и пыльцевой диаграммы, разделенной на пять локальных пыльцевых зон, отражающей смену растительных сообществ от перигляциальных ландшафтов в позднеледниковье до формирования бореальных лесов в голоцене. Анализ пыльцевых спектров позволил выделить ключевые периоды в истории растительности региона, начиная с 13300 л.н. и до 400 л.н., и отследить изменения в составе растительности и процесс заболачивания.

Ключевые слова: динамика растительности, голоцен, пыльцевой анализ, Северо-Запад России, Восточная Европа

Для цитирования: Камыгина А.В., Ершова Е.Г. Палинология озера Мотыкино в голоцене (Вологодская область, Северо-Запад европейской части России) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 340-345. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-340](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-340)

1. Введение

Молого-Шекснинская низменность (МШН) занимает важное положение для изучения и реконструкции динамики растительности и природно-климатических условий позднеледникового периода и голоцена (Sadokov et al., 2022). Однако, до сих пор хронология изменений в центральной части МШН, а также вопрос формирования ледниковых отложений в этом регионе, остаются недостаточно изученными (Сапелко и Садоков, 2022). Таким образом, данная территория представляет большой интерес для дальнейших исследований в этом направлении.

Озеро Мотыкино (N 58.550895°, E 37.613226°) расположено на севере Восточно-Европейской равнины на высоте 104 м н.у.м. (Вологодская область), находится в бореальной климатической зоне восточноевропейской тайги. Площадь озера составляет 0,023 км², а его средняя глубина – 3 м, оно относится к малым реликтовым озерам, сохранившимся

со времени дегляциации последнего покровного оледенения (Sadokov et al., 2022). В растительном покрове преобладают еловые и сосновые леса, с участием лиственных пород. Среди основных древесных пород можно выделить *Picea abies* (L.) H.Karst, *Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Betula pubescens* Ehrh. и *Populus tremula* L. Также здесь встречаются такие виды как *Alnus incana* (L.), *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. и различные виды из рода *Salix*.

Озеро расположено на особо охраняемой природной территории – Дарвинский природный биосферный заповедник, более 80% территории которого занимают сфагновые верховые болота и заболоченные леса, а на заболоченных равнинах расположено около двух десятков небольших озер (Кузнецов и др., 2006). В растительном покрове в пределах болота преобладают *Pinus sylvestris* L. и *Ericaceae*, с участием рода *Carex*. Ближайшее современное поселение (поселок Борок) находится в 4 км от озера.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: camygina@yandex.ru (А.В. Камыгина)

Поступила: 01 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Следует отметить, что озеро Мотыкино ранее не было изучено с палеоэкологической точки зрения.

2. Материалы и методы

Керны озерных отложений были извлечены в марте 2022 года полуцилиндрическим русским буром (диаметр 5 см, длина пробоотборника 1 м) с поверхности льда льда. Суммарная мощность вскрытых отложений составила 236 см (три керна). Литологическое описание и фотодокументация кернов были осуществлены непосредственно после их извлечения.

Хронология основана на 5 датах, полученных в AMS лаборатории А.Э. Лалонда в Оттавском университете. Осадконакопление было равномерным. Средняя скорость осадконакопления составляет примерно 55 лет/см.

3. Результаты и обсуждение

В полевых условиях было собрано и описано 236 см отложений. Нижняя часть керна (236-189 см) была представлена слабо минерализованным сапропелевидным торфом средней степени разложения. Начиная с глубины 220 см и до 190 см наблюдается ритмичная цветовая слоистость, выделенная на основе различий в плотности, ботаническом составе и минерализации. После маломощного слоя 190-189 см, представленного зеленоватым органомным алевропелитом, осадки до своей верхней границы (189-0 см) представлены вязкими слабоплотными илами с большим количеством растительных макроостатков. Подстилающие породы не были захвачены.

На основе стратиграфического кластерного анализа (CONISS) пыльцевая диаграмма (Рис. 1) была разделена на 5 локальных зон скопления пыли (LPZs 1-5).

LPZ 1 (13300-11500 лет назад) Спектры значительно отличаются от других зон в колонке и характеризуются преобладанием пыли *Poaceae*, в том числе $>40 \mu\text{m}$, *Artemisia* sp. и *Chenopodiaceae*. Первая половина зоны характеризуется быстрым увеличением численности *Picea* sp.

LPZ 2 (11500-8200 лет назад). Спектры характеризуются преобладанием пыли *Betula* sp. Быстро уменьшается доля *Picea* sp., но растет количество пыли *Pinus* sp. Доля трав сокращается. Появляется пыльца *Nymphaea* sp. и растет доля *Suregadae*, что может свидетельствовать о наличии вблизи открытого водоёма.

LPZ 3 (8200-5500 лет назад). Спектры характеризуются значительным возрастанием доли *Alnus* sp., *Quercus* sp., *Ulmus* sp. и *Tilia* sp. Уменьшается количество пыли *Betula* sp. Появляется индикатор заболачивания *Sphagnum* sp.

LPZ 4 (5500-2500 лет назад). Присутствие всех древесных таксонов в спектрах колеблется внутри зоны. Продолжает снижаться количество пыли *Betula* sp., но растет доля *Pinus* sp. и *Picea* sp. Наблюдается постепенный рост числа спор *Sphagnum* sp.

LPZ 5 (2500-400 лет назад). Увеличение содержания пыли *Pinus* sp., *Artemisia* sp. и *Poaceae*, в том числе $>40 \mu\text{m}$, коррелирует со снижением доли пыли широколиственных деревьев и *Picea* sp. на протяжении всей зоны. Количество спор *Sphagnum* sp. продолжает расти.

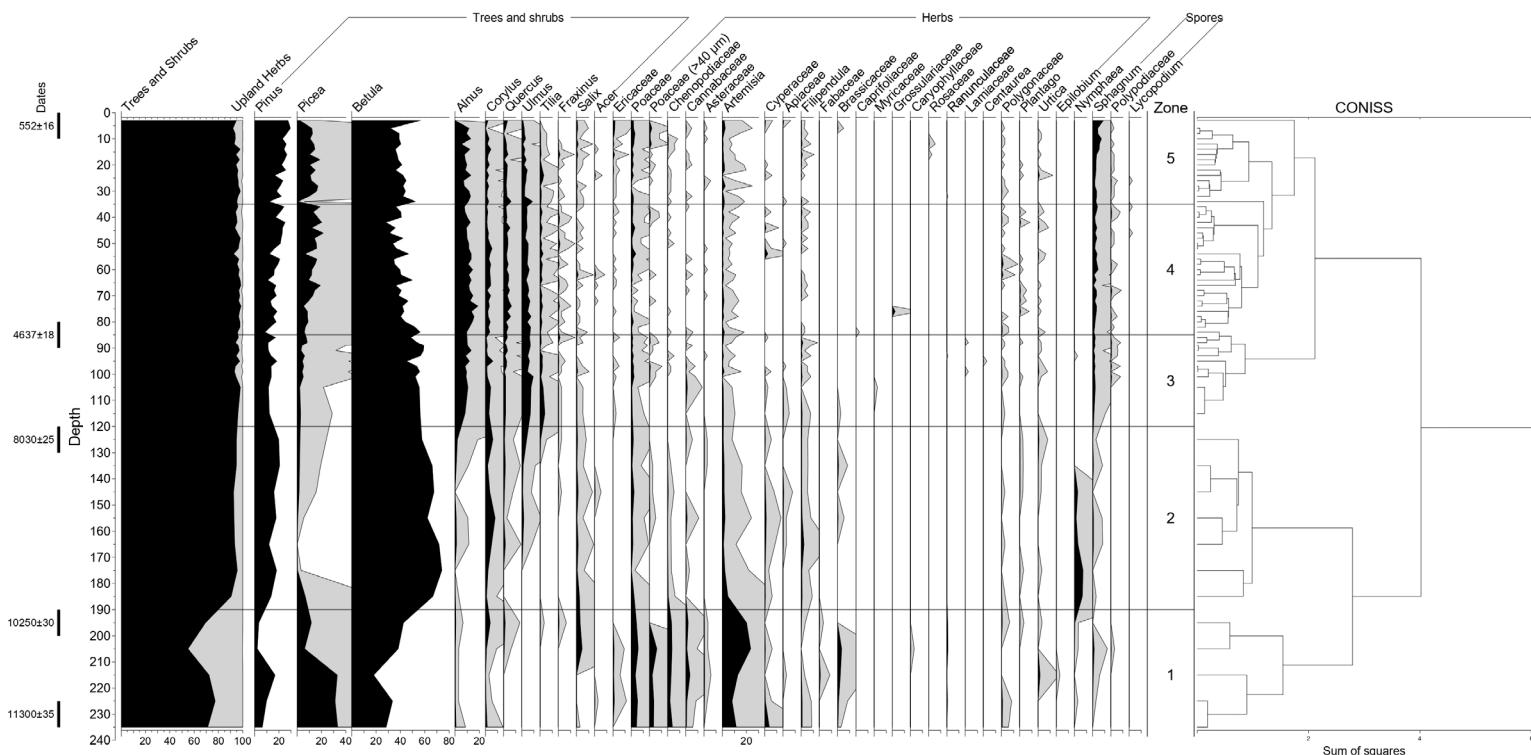


Рис.1. Диаграмма процентного содержания пыли в донных отложениях озера Мотыкино (Вологодская область).

4. Выводы

Анализ отложений озера Мотыкино, включающий литологическое описание, радиоуглеродное датирование, спорово-пыльцевой анализ и оценку скорости и равномерности осадконакопления позволил выделить 5 локальных пыльцевых зон, отражающих основные этапы развития растительности, и реконструировать историю динамики растительности региона за последние 13300 лет: от тундро-степных перигляциальных ландшафтов позднего плейстоцена до современных голоценовых бореальных лесов.

Результаты исследования вносят важный вклад в понимание истории развития экосистем прошлого на территории Молого-Шекснинской низменности и создают основу для дальнейшего изучения изменений природных условий в регионе.

Благодарности

Исследование выполнялось в рамках проекта РНФ 19-14-00102 и программы НИР в Дарвинском заповеднике № 122061700062-1. Авторы выражают благодарность к.г.-м.н. Д.О. Садокову.

Конфликт интересов

Автор(ы) не сообщают о потенциальном конфликте интересов.

Список литературы

Кузнецов А.В., Зеленецкий Н.М., Рыбникова И.А. и др. 2006. Очерк природных условий Дарвинского заповедника. Труды Дарвинского государственного природного заповедника. С. 5-21.

Сапелко Т.В., Садоков Д.О. 2022. Палинология озер Молого-Шекснинской низменности. Актуальные проблемы современной палинологии: Материалы XV Всероссийской палинологической конференции. Под ред. Н. С. Болиховской. Москва, С. 316-320.

Sadokov D.O., Sapelko T.V., Fedorov G.B. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1562-1564. DOI:[10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562)

Fossil cladoceran record from Lake Beloe in the Altai region (Western Siberia) during the late Holocene



Frolova L.A.^{1,2*}, Nigmatullin N.M.¹, Ibragimova A.G.¹, Li H.C.³, Nurgaliev D.K.¹

¹Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 4/5, Kazan, 420008, Russia

²Institute of archaeology and ethnography of the Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Avenue 17, Novosibirsk, 630090, Russia

³Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, POC

ABSTRACT. An analysis of subfossil Cladocera in a 193-cm sediment core from Lake Beloe (Altai region) was conducted to trace the history of limnological conditions in the lake over the past 4600 years. Currently, a total of 34 Cladocera taxa were identified in the taphocenosis. The greatest cladoceran species richness was observed among littoral forms of Cladocera, reflecting the presence of shallow areas overgrown with macrophytes. The highest concentration of cladoceran remains was observed in the lower horizons of the core (150-191 cm, 3600-4600 cal yr BP). In this zone, the highest values of Hill indices are recorded, indicating high taxonomic diversity in the community. At a depth of 141 cm (3500 cal yr BP), significant changes in community structure occur, with *Chydorus* cf. *sphaericus* beginning to dominate. Taxonomic diversity of Cladocera noticeably increases in the upper part of the core.

Keywords: paleoecology, Altai region, subfossil Cladocera

For citation: Frolova L.A., Nigmatullin N.M., Ibragimova A.G., Li H.C., Nurgaliev D.K. Fossil cladoceran record from Lake Beloe in the Altai region (Western Siberia) during the late Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 346-351. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-346

1. Introduction

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) are benthic and planktonic microcrustaceans playing a key role in freshwater ecosystems worldwide (Nevalainen et al., 2011). Lake sediments typically contain natural archives of zooplankton remains, including Cladocera, offering an excellent opportunity to study past communities (Battarbee, 2000). The most common fossilized remains in lake sediments are fragments of Cladocera exoskeletons (Frolova et al., 2018). Subfossil Cladocera remains have become reliable ecological indicators for freshwater ecosystems and have been frequently used in paleolimnological reconstructions in recent decades (Frolova et al., 2014; Nigmatullin et al., 2021). Combined with the widely used palynological (Nigamatzyanova et al., 2020) and diatom (Valieva et al., 2020) analyses, the use of cladoceran remains in sediment cores allows for the most comprehensive reconstruction of the paleoecological conditions of a region. The aim of this study is to examine the changes in the subfossil Cladocera community in a sediment core from Lake Beloe (Altai region) to identify the characteristics of the formation and development of the lake and its paleoecological conditions.

*Corresponding author.

E-mail address: larissa.frolova@kpfu.ru (L.A. Frolova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

2. Materials and Methods

During the summer research expedition in 2022, paleoecological studies were conducted at Beloe Lake (51°17.420' E 082°39.100' N) in the Altai Krai region. There was abundant development of macrophytes along the shores of the lake. Using a UVITEC gravity corer (Austria), a 193 cm long sediment core, labeled 22-Bel-01 C, was collected from the maximum depth of the lake. The analysis of subfossil Cladocera was carried out according to standard methods (Korhola and Rautio, 2001). Identification keys for Cladocera in sediments and zooplankton were used (Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007; Kotov et al., 2010; Korovchinskii et al., 2021). Ecological zones in the sediment core were distinguished using CONISS cluster analysis in the Tilia 3.0.1 software. The richness and diversity of cladoceran were calculated as the effective taxon numbers N0 (total taxa richness), N1 (common taxa richness), and N2 (dominant taxa richness) proposed by Hill (1973). Evenness (E) was calculated as the N2/N0 ratio (Hill, 1973).

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and Discussion

The cladoceran analysis of the samples revealed 34 taxa of subfossil Cladocera from 8 families, with the highest diversity in the Chydoridae family (71%). In the lower part of the core, the maximum concentration of remains is observed, with a peak at 160-161 cm (4100 cal yr BP) (7.6 thousand ind./g), indicating favorable conditions for Cladocera during that period. Most of the identified subfossil remains belong to littoral-benthic forms of Cladocera. The dominant taxon was identified as *C. cf. sphaericus* (35.1%). Littoral taxa also reach significant numbers: *Alona quadrangularis*, *Alonella nana*, *Biapertura affinis*, *Acroperus harpae*, *Bosmina (Eubosmina) longispina* and *Alona guttata / Coronatella rectangula*. Among the conditionally planktonic group, the most numerous species was *Bosmina longirostris*, which can be abundant in both pelagic and littoral zones of the water body.

Four ecological zones are clearly distinguished in the sediment core. In zone I (150-191 cm, 3600-4600 cal yr BP), high species richness was recorded, primarily consisting of littoral organisms. The most abundant taxa in terms of remains were *B. longirostris* (25.6%) and *A. harpae* (19.3%). There is significant diversity among the benthic-phytophilic taxa: *A. nana*, *Sida crystallina*, *A. guttata / C. rectangula*, *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *Eurycercus* sp., *B. affinis*, and *A. excisa*. Presumably, the lake was highly productive and had a higher trophic status than it does today. In this zone, the highest values of Hill indices ($N_0 = 13.6$; $N_1 = 8.8$; $N_2 = 6.7$; $E = 0.49$) are recorded, indicating high species diversity during that period.

Zone II (90-141 cm, 2100-3600 cal yr BP) is characterized by a slight decrease in the taxonomic diversity of cladocerans (15 taxa identified). Significant changes are observed in the structure of the Cladocera community: the share of *C. cf. sphaericus* (54.0%) in the subfossil remains sharply increases, while the share of *A. harpae* critically decreases, and the share of *B. longirostris* also declines. We can assume that these community changes are related to some transformations in the littoral zone, which led to changes in the habitat conditions for benthic-phytophilic forms.

In Zone III (50-81 cm, 1200-2100 cal yr BP), while there is a slight decrease in the number of *C. cf. sphaericus* (46.5%) which still remains a dominant species in the assemblage, there is an increase in the remains of such taxa as *A. quadrangularis*, *B. affinis*, *B. longirostris*, and *A. nana*. The abundance of phytophilic taxa indicate the presence of macrophyte thickets in the littoral zone of the lake. An increase in the share of the taxon *B. longirostris* often indicates an increase in the trophic status of the water body.

The maximum taxonomic richness was recorded in the upper part of the core in Zone IV (0-46 cm, modern-1200 cal yr BP) (24 Cladocera taxa). This increase is primarily due to the rise in littoral-benthic forms of Cladocera. *C. cf. sphaericus* still dominates the community (35.3%). The increase in diversity of littoral taxa indicates higher productivity of the water body, which may be associated with anthropogenic impact.

4. Conclusions

The study revealed 34 taxa of subfossil Cladocera, with the greatest richness belonging to the Chydoridae family. The highest density of Cladocera remains (7.6 thousand ind./g) was registered at a depth of 160-161 cm (4100 cal yr BP), indicating optimal conditions for their development during this period. Littoral forms of cladocerans made the largest contribution to the taxonomic diversity. True planktonic taxa were represented by occasional findings, indicating a shallow depth of the water body throughout the studied period and a high degree of macrophyte development.

Acknowledgements

The work was carried out as part of the RSF project 22-47-08001. Thanks the NTUAMS Lab for chronology construction.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Battarbee R.W. 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews* 19: 107–124. DOI: [10.1016/S0277-3791\(99\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00057-8)
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. 2018. Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta (Nenets Autonomous Region, Russia). *Proceedings of 18th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM 18*: 621-627. DOI: [10.5593/sgem2018/5.1/S20.080](https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080)
- Hill M. 1973. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology* 54: 427–432.
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)
- Korovchinskii N.M., Kotov A.A., Sinev A.Yu. et al. 2021. Water fleas (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 2. (in Russian)
- Kotov A.A., Sinev A.Ju., Glagolev S.M. et al. 2010. Water fleas (Cladocera). In: *Identification key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 1: 151-276. (in Russian)
- Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K., Luoto T.L. 2011. Sedimentary Cladocera as indicators of past water-level changes in shallow northern lakes. *Quaternary Research* 75: 430-437. DOI: [10.1016/j.yqres.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.007)
- Nigmatzyanova G., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. Vegetation and climate changes in the Northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: *20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1*: 547-552. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.068](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068)
- Nigmatullin N., Frolova A., Nigmatzyanova G. et al. 2021. Reconstruction of lacustrine environmental evolu-

tion using records of subfossil Cladocera from an unnamed lake in Western Siberia (Russia). In: Proceedings of 21th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. 4(19): 423-428. DOI: [10.5593/sgem2021/4.1/s19.54](https://doi.org/10.5593/sgem2021/4.1/s19.54)

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. Atlas of subfossil Cladocera from central and northern Europe. Friends Lower Vistula Soc.

Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. 2020. Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 391-398. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.049](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049).

Субфоссильные кладоцерные сообщества донных отложений оз. Белое (Алтайский край, Сибирь) в позднем голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYФролова Л.А.^{1,2*}, Нигматуллин Н.М.¹, Ибрагимова А.Г.¹,
Li H.C.³, Нургалиев Д.К.¹¹ Казанский федеральный университет, Ул. Кремлевская д. 4/5, Казань, 420008, Россия² Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН, пр. Академика Лаврентьева д. 17, Новосибирск, 630090, Россия³ Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC

АННОТАЦИЯ. Был выполнен анализ субфоссильных Cladocera в 193 см колонке донных отложений озера Белое (Алтайский край). В составе кладоцерных сообществ было идентифицировано 34 таксона ветвистоусых ракообразных. Оценка альфа разнообразия показала, что наибольшее видовое разнообразие наблюдалось в группе литоральных организмов, отражая представленность мелководных участков заросших макрофитами. Максимальная концентрация остатков кладоцер наблюдается в нижней части колонки ДО (150-191 см, 3600-4600 кал. л.н.). В этой же зоне регистрируются максимальные значения индексов Хилла, указывая на высокое таксономическое разнообразие в сообществе. На глубине 141 см (3500 кал. л.н.) происходят значительные изменения в структуре сообщества, где начинает доминировать *Chydorus cf. sphaericus*. Несколько увеличивается таксономическое разнообразие Cladocera в верхней части колонки.

Ключевые слова: палеоэкология, Алтайский край, субфоссильные Cladocera

Для цитирования: Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Ибрагимова А.Г., Li H.C., Нургалиев Д.К. Субфоссильные кладоцерные сообщества донных отложений оз. Белое (Алтайский край, Сибирь) в позднем голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 346-351. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-346](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-346)

1. Введение

Cladocera (Crustacea: Branchiopoda) — это группа бентосных и планктонных микроракообразных, играющих ключевую роль в пресноводных экосистемах по всему миру (Nevalainen et al., 2011). Донные отложения озер обычно содержат естественный архив остатков зоопланктонных организмов, в том числе и кладоцер, что предоставляет прекрасную возможность для изучения сообществ, обитавших некогда в этом водоеме (Battarbee, 2000). Наиболее распространенными фоссилизированными остатками в озерных отложениях являются фрагменты экзоскелета кладоцер (Frolova et al., 2018). Остатки субфоссильных Cladocera стали надежными экологическими индикаторами для пресноводных экосистем и часто применяются в палеолимнологических реконструкциях в последние десятилетия (Frolova et al., 2014; Nigmatullin et al., 2021). В комплексе с широко распространенным палинологическим (Nigamatzyanova et al., 2020) и диатомовым (Valieva et al., 2020) анализами использование остатков кла-

доцер в донных отложениях позволяет нам провести наиболее полную реконструкцию палеоэкологических условий региона. Целью данной работы является изучение изменений в сообществе субфоссильных Cladocera в колонке донных отложений из озера Белое (Алтайский край) для выявления особенностей формирования и развития водоема и его палеоэкологических условий.

2. Материал и методы

В ходе летней научно-исследовательской экспедиции в 2022 году на территории Алтайского края были проведены палеоэкологические исследования на озере Белое (N 51°17.420' E 082°39.100'N). При помощи гравитационного пробоотборника UVITEC (Австрия) была отобрана колонка 22-Bel-01 с донных отложений длиной 193 см с максимальной глубины озера. Анализ субфоссильных Cladocera был выполнен по стандартной методике (Korhola and Rautio, 2001). В работе были использованы опреде-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lariisa.frolova@kpfu.ru (Л.А. Фролова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



лительные ключи для Cladocera в донных отложениях и в зоопланктоне (Szeroczyńska and Sarmaja-Korjonen, 2007; Kotov et al., 2010; Korovchinskii et al., 2021). Экологические зоны в колонке донных отложений были выделены при помощи кластерного анализа CONISS в программе Tilia 3.0.1. Богатство и разнообразие кладоцер были рассчитаны как производные от количества таксонов N0 (общее богатство таксонов), N1 (богатство обычных таксонов) и N2 (богатство доминирующих таксонов), предложенные Хиллом (Hill, 1973). Выравненность (E) была рассчитана как отношение N2/N0 (Hill, 1973).

3. Результаты и обсуждения

В результате кладоцерного анализа образцов было выявлено 34 таксона субфоссильных Cladocera из 8 семейств, где наибольшее разнообразие приходится на семейство Chydoridae (71%). В нижней части колонки наблюдается максимальная концентрация остатков, пик значений приходится на 160-161 см (4100 кал. л.н.) (7.6 тыс. экз./г), что может свидетельствовать о благоприятных условиях для развития Cladocera в указанный период. Большая часть обнаруженных субфоссильных остатков принадлежит литорально-бентосным формам кладоцер. В качестве доминантного таксона был выделен *C. cf. sphaericus* (35.1%). Второстепенными таксонами оказались такие литоральные формы как *Alona quadrangularis*, *Alonella nana*, *Biapertura affinis*, *Acroperus harpae*, *Bosmina (Eubosmina) longispina* и *Alona guttata / Coronatella rectangula*. Из условно планктонной группы наибольшее количество обнаруженных экземпляров принадлежит *Bosmina longirostris*, которая может обильно встречаться как в пелагической, так и в литоральной зоне водоема.

В колонке донных отложений четко выделяются четыре экологические зоны. В зоне I – (150-191 см, 3600-4600 кал. л.н.) зафиксировано высокое видовое богатство, обеспеченное в основном литоральными организмами. Наиболее обильными по количеству остатков были *B. longirostris* (25.6%) и *A. harpae* (19.3%). Большое разнообразие наблюдается в группе второстепенных таксонов: *A. nana*, *Sida crystallina*, *A. guttata / C. rectangula*, *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *Eurycercus sp.*, *B. affinis* и *A. excisa*. Предположительно водоем был высокопродуктивным и имел более высокий трофический статус, чем сегодня. В этой зоне регистрируются максимальные значения индексов Хилла (N0 = 13.6; N1 = 8.8; N2 = 6.7; E = 0.49), что указывает на высокое видовое разнообразие в тот период.

Зона II (90-141 см, 2100-3600 кал. л.н.) характеризуется некоторым снижением таксономического разнообразия ветвистоусых ракообразных (идентифицировано 15 таксонов). Наблюдаются масштабные изменения в структуре сообщества кладоцер: резко увеличивается доля *C. cf. sphaericus* (54.0%) в субфоссильных остатках, при критическом снижении доли *A. harpae*, снижается доля *B. longirostris*.

В зоне III (50-81 см, 1200-2100 кал. л.н.)

на фоне некоторого снижения количества *C. cf. sphaericus* (46.5%), который остается доминантным видом в сообществе, происходило увеличение количества остатков таких таксонов, как *A. quadrangularis*, *B. affinis*, *B. longirostris* и *A. nana*. Обилие фитофильных таксонов свидетельствует о наличии значительных зарослей макрофитов в литоральной зоне озера. Увеличение доли таксона *B. longirostris* часто указывает на повышение трофности водоема.

Максимальное таксономическое богатство было зафиксировано в верхней части керна в зоне IV (0-46 см, (-100)-1200 кал. л.н.) (24 таксона ветвистоусых ракообразных). В первую очередь происходит увеличение литорально-бентосных форм Cladocera. В сообществе по-прежнему доминирует *C. cf. sphaericus* (35.3%). Увеличение разнообразия литоральных таксонов указывает на повышение продуктивности водоема, что может быть связано с антропогенным воздействием.

4. Выводы

Проведенное исследование выявило 34 таксона субфоссильных Cladocera, где наибольшее разнообразие принадлежало семейству Chydoridae. Наибольшая плотность остатков Cladocera (7.6 тыс. экз./г) наблюдается на глубине 160-161 см (4100 кал. л.н.), что указывает на оптимальные условия для их развития в этот период. Наибольший вклад в таксономическое разнообразие внесли литоральные формы ветвистоусых ракообразных. Истинно планктонные таксоны были представлены единичными находками, что свидетельствует о небольшой глубине водоема на протяжении всего изученного периода и высокой степени развития макрофитов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 22-47-08001. Отдельную благодарность хотелось бы выразить руководителю и сотрудникам лаборатории NTUAMS (Национальный Тайваньский университет, Тайпэй, Тайвань) за выполнение датирования образцов донных отложений.

5. Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Battarbee R.W. 2000. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews* 19: 107–124. DOI: [10.1016/S0277-3791\(99\)00057-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00057-8)
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Frolova A. 2018. Paleolimnological studies of tundra lakes in the Pechora delta

(Nenets Autonomous Region, Russia). Proceedings of 18th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM 18: 621-627. DOI: [10.5593/sgem2018/5.1/S20.080](https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.1/S20.080)

Hill M. 1973. Diversity and evenness: A unifying notation and its consequences. *Ecology* 54: 427–432.

Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)

Korovchinskii N.M., Kotov A.A., Sinev A.Yu. et al. 2021. *Water fleas (Crustacea: Cladocera) of Northern Eurasia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 2. (in Russian)

Kotov A.A., Sinev A.Ju., Glagolev S.M. et al. 2010. *Water fleas (Cladocera)*. In: *Identification key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia*. Moscow: Tov-vo. Nauchn. Izd. KMK. 1: 151-276. (in Russian)

Nevalainen L., Sarmaja-Korjonen K., Luoto T.L. 2011. Sedimentary Cladocera as indicators of past water-level changes in shallow northern lakes. *Quaternary Research* 75: 430-437. DOI: [10.1016/j.yqres.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2011.02.007)

Nigamatzyanova G., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. Vegetation and climate changes in the Northeast European Russia (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 547-552. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.068](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.068)

Nigmatullin N., Frolova A., Nigamatzyanova G. et al. 2021. Reconstruction of lacustrine environmental evolution using records of subfossil Cladocera from an unnamed lake in Western Siberia (Russia). In: Proceedings of 21th International multidisciplinary scientific Geoconference SGEM. 4(19): 423-428. DOI: [10.5593/sgem2021/4.1/s19.54](https://doi.org/10.5593/sgem2021/4.1/s19.54)

Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. 2007. *Atlas of subfossil Cladocera from central and northern Europe*. Friends Lower Vistula Soc.

Valieva E., Frolova L., Nigamatzyanova G. et al. 2020. Diatoms in bottom sediments of the arctic lake in the Pechora River delta (Nenets Autonomous Okrug, Russia). In: 20th International Multidisciplinary Scientific Geoconference: Energy and Clean Technologies, SGEM 2020 4.1: 391-398. DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.049](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.049)

Biogeochemical features of the formation of Holocene sediments in Lake Dukhovoe (Eastern Baikal)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYLeonova G.A.¹, Maltsev A.E.^{1*}, Kondratieva L.M.², Krivonogov S.K.¹¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, av. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia² Institute for Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, st. Dikopoltseva 56, Khabarovsk, 680000, Russia

ABSTRACT. A 6-meter core of Holocene sediments from Lake Dukhovoe was studied. As shown by the radiocarbon dating of lacustrine sediments, Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene (10 cal ka BP). The upper 180 cm of sediment is represented by sapropel, and the boundary of lake sediments is at 293 cm. This is an early stage of lake evolution, devoid of biogenic sedimentation. The microbiological studies of the sediment were carried out, which showed a high total number of heterotrophic bacteria in the upper (0–15 cm) and deeper (110–180 cm) sapropel intervals. Mineral bottom sediments (180–293 cm) are characterized by the presence of groups of phosphorus-reducing and ferromanganese bacteria. The contents of Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr and Cr in sapropel are within the average concentrations for the earth's crust, and U and Mo exceed them.

Keywords: age model, Holocene, sapropel, microorganisms, transformation of organic matter, biogeochemistry

For citation: Leonova G.A., Maltsev A.E., Kondratieva L.M., Krivonogov S.K. Biogeochemical features of the formation of Holocene sediments in Lake Dukhovoe (Eastern Baikal) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 352-357. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-352

1. Introduction

The fact that the formation of organogenic bottom sediments (sapropels) in continental lakes at the stage of early diagenesis is understudied makes this problem extremely urgent both in theoretical and practical aspects (Melenevskii et al., 2015; Maltsev et al., 2019). Sapropels are characteristic deposits of lakes in the temperate zone and are closely related to natural zonality, which determines the development of biogenic products (Kurzo et al., 2012). Sapropels of modern lakes in the Eastern Baikal region (including Lake Dukhovoe) were formed during the Holocene under conditions of postglacial warming.

2. Materials and methods

Lake Dukhovoe (53°18' N, 108°53' E) is located 18 km south of the mouth of the Barguzin River and 2 km from Lake Baikal at an altitude of 514 m above sea level and 58 m above the Lake Baikal level. The lake is 4.4 km long, 2.3 km wide, and no more than 2.8 m deep. The water area is 6.16 km², and the catch basin is

87.5 km². The ecological conditions characterizing the current state of Lake Dukhovoe (shallow water and lack of water stratification by oxygen and temperature) are favorable for the mass development of phytoplankton groups microscopic in size. It is the main bioproducer of organic matter that forms planktonic sapropel in the lake. In the central part of Lake Dukhovoe, a well was drilled and a core 6.0 m in length and 7.5 cm in diameter was retrieved. This made it possible to study the features of the formation of stratified bottom sediments during the Holocene.

Microbiological studies on determining the abundance and layer-by-layer distribution of various physiological groups of aerobic and anaerobic microorganisms over the depth of the bottom sediment core were carried out at the Institute for Water and Environmental Problems. The characterization of microbial communities was studied by a culturedependent method, which includes planting a suspension of bottom sediments on selective agar media using the limit dilution method. The method of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP AES) was used to determine the concentration of chemical elements in water, sedi-

*Corresponding author.

E-mail address: maltsev@igm.nsc.ru (A.E. Maltsev)

Received: May 20, 2024; Accepted: July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



ments and biota. The mineral composition was studied by X-ray powder diffractometry on a DRON-4 diffractometer, Cu-K α radiation. Radiocarbon dating of the sediments was carried out at the FSC MIS IGM SB RAS using the scintillation method. Residual carbon activity was measured on a QUANTULUS-1220 liquid scintillation counter. The age was calculated on the basis of half-life of ^{14}C at 5570 years. Further calibrations were performed using CALIB 7.1 (Reimer et al., 2013).

3. Results and discussion

3.1. Age and sedimentation rate

The core of the bottom sediments of Lake Dukhovoe is heterogeneous and has a clear layering. Lake sediments occur in the interval of 0–293 cm. The following layers are distinguished: planktogenic sapropel (0–180 cm), transitional organomineral layer (180–205 cm) and dense mineral silt (205–293 cm), which is underlain by dark gray loose clays with an admixture of unsorted material (293–600 cm).

Fig. 1 shows the linear trend of calibrated radiocarbon dates in the age—depth model. The calibrated dates approximate the linear trend well, except for the date from a depth of 57–62 cm. This one is much younger for some unknown reason and should be excluded from the set as an error. The trend line shows an age of 5.5 cal ka BP for the boundary between the organic and organomineral sediment layers at a depth of 180 cm and ~6 cal ka BP for the boundary between the organomineral and mineral layers at a depth of 205 cm. At a depth of 293 cm, the age of the deposits is estimated at about 10 cal ka BP. The boundary of lake sediments is at 293 cm. An interval of 205–293 cm can be considered as the basal layer representing the early stage of the development of the lake and devoid of biogenic sedimentation. The sediment interval of 0–205 cm contain preserved diatom valves and an increase in the content of structureless OM toward the upper part of the core, thereby demonstrating further biota-enriched stages in the history of the lake. Dating the lacustrine sediments by the radiocarbon method shows that Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene, and the accumulation of sapropel began in the Middle Holocene ~5 cal ka BP and had high sedimentation rates at the early stages of its formation.

3.2. Biogeochemistry of lake sediments

A high total abundance of heterotrophic bacteria (TAHB), which use a wide range of organic compounds as energy and carbon sources, is noted in an upper interval of the section (0–15 cm) and a deeper interval (110–180 cm) (Fig. 2a). The distribution of ammonifying bacteria (AMB), nitrifying bacteria (NB) and denitrifying bacteria (DNB) participating in the nitrogen cycle along the section of bottom sediments allows us to identify 3 stages of decomposition of organic matter (OM). At the first stage of destruction of nitrogen-containing organic substances, which are easily metabolized compounds, AMB are involved, the main waste products of which are NH_4^+ and CO_2 . At the second stage, AMB is

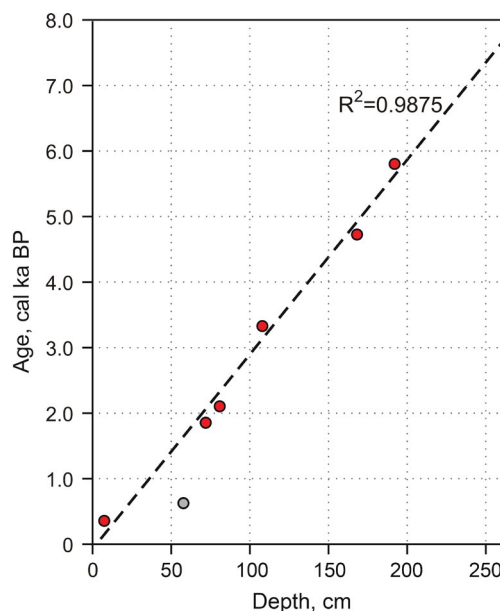


Fig. 1. Linear trend of calibrated radiocarbon dates in the age—depth model.

replaced by NB, which carry out step-by-step nitrification. To complete the decomposition of OM, the available oxidized form of nitrogen (NO_3^-) is used — with the participation of DNB, the process of denitrification occurs. In the lower intervals of sapropel, growth of sulfate-reducing bacteria (SRB) is noted. Mineral bottom sediments (180–293 cm) are characterized by the presence of groups of phosphorus-reducing (PRB) and ferromanganese bacteria (FMB) (Fig. 2b).

The distribution of the Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Zr, and Cr concentrations in the sapropel interval (0–180 cm) is quite consistent, the concentrations of these elements increase with depth, but, in general, they are within the average values for the Earth's crust, shales, and oceanic pelagic clays. Fe and Mn are concentrated in the upper (0–10 cm), middle (172–321 cm), and lower (321–540 cm) parts of the bottom sediment section. The S, P, and Mo concentrations in the Lake Dukhovoe sapropel exceed the average concentrations of these elements in the Earth's crust, shales, and oceanic pelagic clays. Sapropel is enriched in P, Ca, Rb, Sr, Mn, Fe, Co, Cu, and Zn. However, in general, the enrichment of sapropel with these elements is low, not exceeding 2–5 average contents in shale. Phytoplankton (forms OM of sapropel) is enriched with phosphorus (biogenic element) and chalcophile elements (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), which characterize the pollution of the modern atmosphere.

Pore waters are transformed during diagenesis. There is an increase in the mineralization of pore water up to 350–470 mg/L compared to lake water (120 mg/L), an increase in the concentrations of biogenic components (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) and a decrease in SO_4^{2-} , which is explained by an increase in the degree of bacterial destruction of OM and forming of pyrite.

According to the X-ray phase analysis, the main minerals in the bottom sediments of Lake Dukhovoe are plagioclase and quartz. The mineral composition of the bottom sediments also contains mica (disordered),

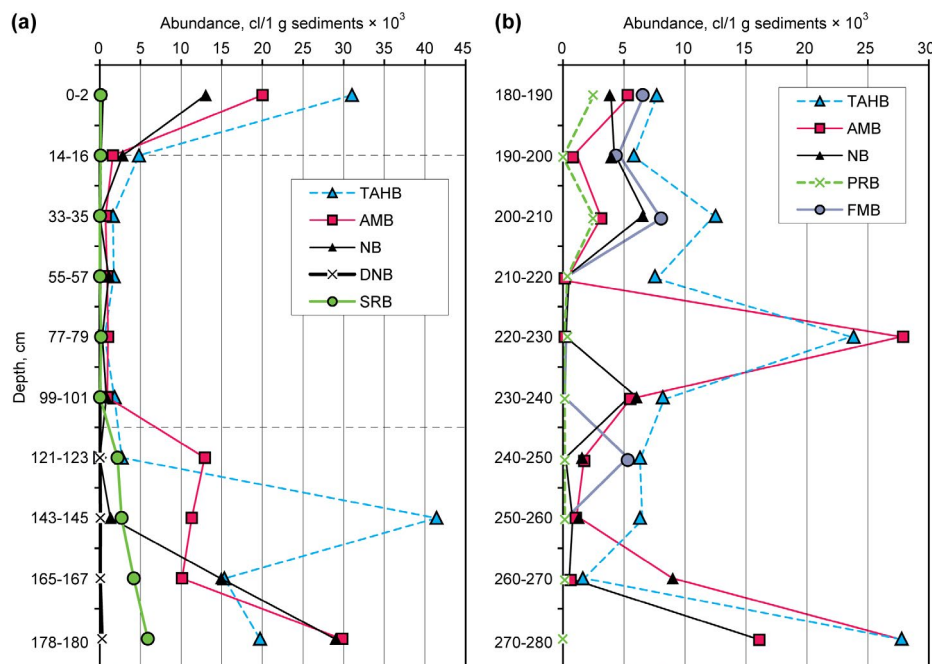


Fig.2. Distribution of physiological groups of bacteria in (a) sapropel (0–180 cm) and (b) mineral sediments (180–293 cm) of Lake Dukhovoe. See abbreviations in the text.

chlorite, and potassium feldspar. The chemical composition of the Lake Dukhovoe sapropel is dominated by SiO_2 , whose average content is 15%. The average contents of Al_2O_3 and Fe_2O_3 in the sapropel section are 4.2 and 5.6%, respectively; the CaO content is 1.2%; the abundance of MgO, Na_2O , and K_2O does not exceed 1%. The $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratio is low (0.2), which clearly demonstrates geochemical specificity — carbonate-free planktonogenic sapropel.

4. Conclusion

As shown by the radiocarbon dating of lacustrine sediments, Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene (10 cal ka BP) and the sapropel accumulation began in the Middle Holocene (~5 cal ka BP). A high total number of heterotrophic bacteria was revealed in the upper and deeper intervals of sapropel. The mineral composition of the Lake Dukhovoe sapropel is dominated by SiO_2 . The low value of the $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratio (0.2) clearly demonstrates the geochemical specificity of sapropel, i.e. carbonate-free planktonogenic. The contents of Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr and Cr in sapropel are within the average concentrations for the earth's crust, and U and Mo exceed them. Phytoplankton is enriched with P and chalcophile elements (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), which characterize the pollution of the modern atmosphere of the Baikal region. There is an increase in the mineralization of pore water compared to lake water, an increase in the concentrations of biogenic components (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) and a decrease in SO_4^{2-} .

Acknowledgements

Work is done on state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Projects No 122041400193-7. The reported study was funded by RFBR according to the research Project No 11-05-00655_a. Analytical studies were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research IGM SB RAS.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Kurzo B.V., Gaidukevich O.M., Zhukov V.K. 2012. Researches in the field of genesis, resources and development of sapropel deposits in Belarus. *Prirodopol'zovanie* 22: 57–66. (in Russian)
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A., et al. 2019. Geochemistry of Sapropels in Holocene Sections from Small Lakes in the South of Western Siberia and Eastern Baikal Region. Novosibirsk, Akad. Izd. Geo. (in Russian)
- Melenevskii V.N., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2015. Transformation of organic matter in the Holocene sediments of Lake Ochki (south Baikal region): Evidence from pyrolysis data. *Geochem. Int.* 53(10): 903–921. doi: 10.1134/S0016702915080054
- Reimer P. J., Bard E., Bayliss A. et al. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55(4): 1869–1887. doi: [10.2458/azu.js.rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu.js.rc.55.16947)

Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений озера Духовое (Восточное Прибайкалье)



Леонова Г.А.¹, Мальцев А.Е.^{1*}, Кондратьева Л.М.², Кривоногов С.К.¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

²Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучен 6-метровый керн голоценовых отложений оз. Духовое. Согласно радиоуглеродным датам, озеро образовалось ~10 кал. тыс. л. н. Верхние 180 см осадка представлены сапропелем, а граница озерных отложений находится на отметке 293 см — это ранний этап развития озера, лишенный биогенной седиментации. Проведены послойные микробиологические исследования осадка, которые показали высокую общую численность гетеротрофных бактерий в верхнем (0–15 см) и более глубоком (110–180 см) интервалах сапропеля. Для минеральных отложений (180–293 см) характерно присутствие групп фосфор редуцирующих и железо-марганцевых бактерий. Содержания Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr и Cr в сапропеле находятся в пределах средних концентраций для земной коры, а U и Mo — превышают таковые.

Ключевые слова: возрастная модель, голоцен, сапропель, микроорганизмы, трансформация органического вещества, биогеохимия

Для цитирования: Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Кондратьева Л.М., Кривоногов С.К. Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений озера Духовое (Восточное Прибайкалье) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 352-357. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-352](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-352)

1. Введение

Недостаточная изученность формирования органогенных донных отложений (сапропели) в континентальных озерах ставит эту проблему в ряд чрезвычайно актуальных как в теоретическом, так и практическом, аспектах (Меленевский и др., 2015; Мальцев и др., 2019). Сапропели являются характерными отложениями озер умеренного пояса и тесно связаны с природной зональностью, определяющей развитие той или иной биогенной продукции (Курзо и др., 2012). Сапропели современных озер Восточного Прибайкалья, в том числе и оз. Духовое, формировались в течение голоцена в условиях послеледникового потепления.

2. Материалы и методы

Оз. Духовое (53°18' с.ш., 108°53' в.д.) расположено в Южном Прибайкалье на восточном борту Байкальской впадины, на высоте 514 м над уровнем моря и 95 м над уровнем Байкала, его длина составляет 2500 м, а ширина — 1600 м, глубина не более 2.8 м. Экологические условия, характери-

зующие современное состояние озера, благоприятны для массового развития микроскопических по размерам группировок фитопланктона, который является основным биопродуцентом органического вещества, формирующего в озере планктоногенный сапропель. В центральной части оз. Духовое была пробурена скважина и поднят непрерывный керн с ненарушенной структурой длиной ~6 м, что позволило изучить особенности формирования вскрытой толщи стратифицированных отложений на протяжении голоцена.

Характеристика микробных сообществ изучалась с использованием культурально-зависимого метода, включая посев суспензии донных отложений на селективные агаризованные среды с использованием метода предельного разбавления в Институте водных и экологических проблем ДВО РАН. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) применяли для определения в воде, донных отложениях и биоте концентрации химических элементов. Минеральный состав исследован методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-4, излучение Cu-Kα. Радиоуглеродное

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: maltsev@igm.nsc.ru (А.Е. Мальцев)

Поступила: 20 мая 2024; **Принята:** 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



датирование отложений выполнено в ЦКП МИИ СО РАН сцинтилляционным методом. Остаточную углеродную активность измеряли на жидкостном сцинтилляционном счетчике QUANTULUS-1220. Возраст был рассчитан на основе периода полураспада ^{14}C в 5570 лет. Дальнейшие калибровки были выполнены с помощью CALIB 7.1 (Reimer et al., 2013).

3. Результаты

3.1. Возраст и скорости осадконакопления

По вещественному составу керн донных отложений оз. Духовое неоднороден и имеет четкую слоистость. Озерные отложения залегают в интервале 0–293 см. Выделяются следующие слои: планктоногенный сапропель (0–180 см), переходный органоминеральный слой (180–205 см) и плотный минеральный ил (205–293 см), который подстилают темно-серые рыхлые глины с примесью несортированного материала (293–600 см).

На рисунке 1 представлен линейный тренд калиброванных радиоуглеродных дат в модели возраст—глубина. Калиброванные даты хорошо аппроксимируют линейный тренд, за исключением даты с глубины 57–62 см, которая по неизвестной причине значительно моложе и должна быть исключена из набора как ошибка. Линия тренда показывает возраст 5.5 кал. тыс. л. н. для границы между органическим и органоминеральным слоями отложений на глубине 180 см и ~6 кал. тыс. л. н. для границы между органоминеральным и минеральным слоями на глубине 205 см, на глубине 293 см возраст отложений оценивается около 10 кал. тыс. л. н. Граница озерных отложений находится на отметке 293 см, а интервал 205–293 см можно рассматривать как базальный слой, представляющий ранний этап развития озера, лишенный биогенной седиментации. Интервал отложений 0–205 см содержит в себе сохранившиеся створки диатомовых водорослей и увеличивающееся к верхней части керна содержание бесструктурного органического вещества, демонстрируя, тем самым, дальнейшие обогащенные биотой этапы истории развития озера. Датирование озерных отложений показывает, что оз. Духовое сформировалось в раннем голоцене, а накопление сапропеля началось в среднем голоцене ~5 кал. тыс. л. н. и на ранних этапах своего формирования имело высокие скорости осадконакопления.

3.2. Биогеохимия озерных отложений

Высокая общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГБ), использующих в качестве источников углерода широкий спектр органических соединений отмечена в верхнем (0–15 см) и более глубоком интервале (110–180 см) сапропеля (Рис. 2а). Распределение по разрезу донных отложений оз. Духовое аммонифицирующих (АМБ), нитрифицирующих (НБ) и денитрифицирующих бактерий (ДНБ), участвующих в цикле азота, позволяет выявить 3 стадии деструкции органического

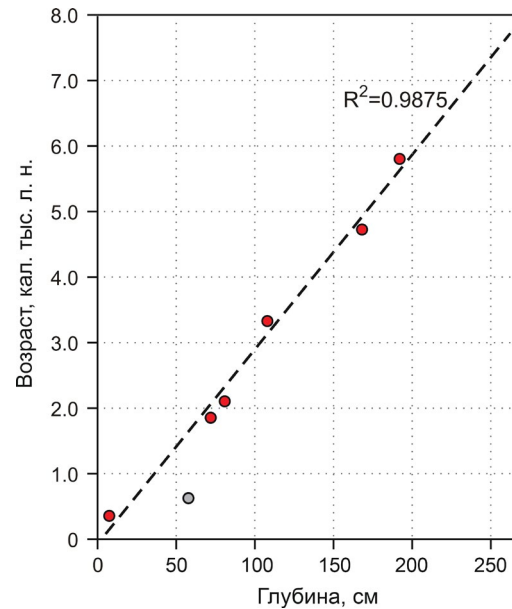


Рис.1. Линейный тренд калиброванных радиоуглеродных дат в модели возраст—глубина.

вещества (ОВ). На первом этапе деструкции азотсодержащих органических веществ, относящихся к легко метаболизируемым соединениям, участвуют АМБ, основными продуктами жизнедеятельности которых являются ионы аммония и углекислого газа. На втором этапе на смену АМБ приходят НБ, которые осуществляют поэтапную нитрификацию. Для завершения деструкции ОВ используется имеющаяся в наличии окисленная форма азота (NO_3^-) — происходит процесс денитрификации при участии ДНБ. В нижних интервалах сапропеля отмечается рост сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). Для минеральных донных отложений (180–293 см) характерно присутствие групп фосфор редуцирующих (ФРБ) и железо-марганцевых бактерий (ЖМБ) (Рис. 2б).

Распределение концентраций Na, Mg, Al, Si, Ca, Zr и Sr достаточно выдержанны в сапропеле (0–180 см), с глубиной концентрации этих элементов увеличиваются, но в целом, находятся в пределах средних значений для земной коры, глинистых сланцев и океанических глин. Fe и Mn концентрируются в верхней (0–10 см), средней (172–321 см) и нижней (321–540 см) частях разреза. Содержания S, P, Mo, U в сапропеле превышают средние концентрации этих элементов в земной коре, глинистых сланцах и океанических глинах. Рассчитанные коэффициенты обогащения (EF) показали, что сапропель незначительно ($\text{EF} = 2\text{--}5$) обогащен P, Ca, Rb, Sr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, что не превышает средние содержания в глинистых сланцах. Фитопланктон (продуцент ОВ сапропеля), напротив, обогащен P (биогенный элемент) и халькофильными элементами — Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu, характеризующими загрязненность современной атмосферы.

В результате диагенетических процессов, протекающих в сапропелевой толще, происходит трансформации поровых вод. Наблюдается рост минерализации поровых вод до 350–470 мг/л по сравнению с озерной водой (120 мг/л), увеличе-

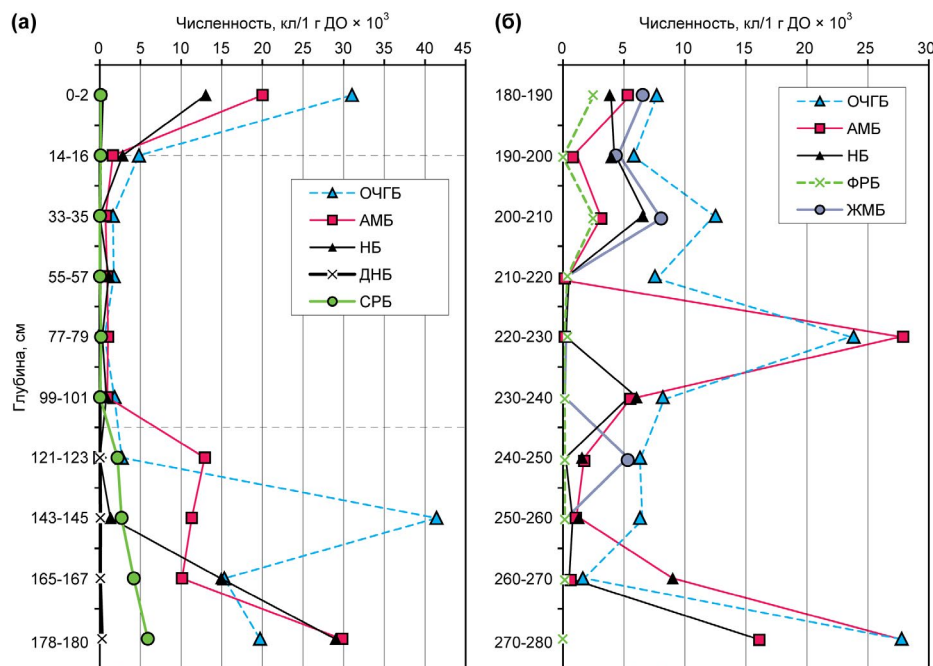


Рис.2. Послойное распределение физиологических групп бактерий в (а) сапропеле (0–180 см) и (б) минеральных осадках (180–293 см) оз. Духовое. Сокращения см. в тексте.

ние концентраций биогенных компонентов (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) и уменьшение SO_4^{2-} . В результате возрастания степени бактериальной деструкции органического вещества SO_4^{2-} расходуется на образование пирита.

Основными минералами в донных отложениях оз. Духовое являются плагиоклаз и кварц, также присутствуют слюда (разупорядоченная), хлорит, калиевый полевой шпат. В следовых количествах присутствуют амфибол. В минеральном составе сапропеля преобладает SiO_2 , средние содержания которого составляют 15%, далее идут Al_2O_3 и Fe_2O_3 с концентрациями 4.2 и 5.6% соответственно, CaO — 1.2%, а MgO , Na_2O , K_2O не превышают 1%. Значение отношения $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ показывает степень «карбонатности» осадка. Это отношение в оз. Духовое невысокое (0.2), что наглядно демонстрирует геохимическую специфику осадка — бескарбонатный планктоногенный сапропель.

4. Заключение

Датирование озерных отложений показало, что озеро сформировалось в раннем голоцене около 10 кал. тыс. л. н., а накопление сапропеля началось в среднем голоцене ~5 кал. тыс. л. н. Высокая общая численность гетеротрофных бактерий выявлена в верхнем и более глубоком интервалах сапропеля. Отношение $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ невысокое (0.2), что указывает на геохимическую специфику осадка — бескарбонатный сапропель. Содержания Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr и Cr в сапропеле находятся в пределах средних концентраций для земной коры, а U и Mo — превышают таковые. Фитопланктон обогащен фосфором и халькофильными элементами (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), характеризующими загряз-

ненность современной атмосферы Прибайкалья. В результате диагенетических процессов происходит трансформации поровых вод — рост минерализации, биогенных компонентов (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) и уменьшение SO_4^{2-} .

5. Финансирование

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400193-7, при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 11-05-00655_а. Аналитическая работа выполнена в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Курзо Б.В., Гайдукевич О.М., Жуков В.К. 2012. Исследования в области генезиса, ресурсов и освоения месторождений сапропеля Беларуси. *Природопользование* 22: 57–66.

Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др. 2019. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья. Новосибирск, Академ. изд-во Гео.

Меленевский В.Н., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др. 2015. Трансформация органического вещества в голоценовых осадках озера Очки (Южное Прибайкалье) по данным пиролиза. *Геохимия* 10: 925–944.

Reimer P. J., Bard E., Bayliss A. et al. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55(4): 1869–1887. DOI: [10.2458/azu_js_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947)

Terrestrial environmental conditions during the Last Interstadial based on analysis of aquatic invertebrate communities from coastal exposures at the Dmitry Laptev Strait



Frolova L.A.^{1,2*}, Nigmatullin N.M.¹, Nazarova L.B.¹,
Wetterich S.^{3,4}, Schirrmeister L.³

¹Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 4/5, Kazan, 420008, Russia

²Institute of archaeology and ethnography of the Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Avenue 17, Novosibirsk, 630090, Russia

³Permafrost Research, Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

⁴Institute of Geography, Technische Universität Dresden, Germany

ABSTRACT. For the first time, data on the composition of cladoceran communities in lake bottom sediments from Bol'shoy Lyakhovsky Island and Oyogos Yar on the coast of the Dmitry Laptev Strait during the last major interglacial period (MIS 5e, 124-119 thousand years ago) have been obtained. 13 Cladocera taxa were identified in the composition of the taphocenoses. The composition of the Cladocera taphocenoses of Oyogos Yar indicates the presence of a well-developed littoral zone in the paleolakes, as most of the cladoceran remains belong to littoral-phytophilic taxa closely associated with macrophytes. In the Cladocera communities of Oyogos Yar, both cold-water representatives and more southern thermophilic taxa, such as *Leydigia leydigi*, were found. The findings of Cladocera remains from the MIS 5e period on the coast of the Laptev Sea, significantly north of their current ranges, allow for the reconstruction of warmer climatic conditions than those of today. The data obtained on Cladocera are well consistent with the results of chironomid analysis.

Keywords: Bol'shoy Lyakhovsky Island, Oyogos Yar, MIS 5e, Cladocera, *Leydigia leydigi*

For citation: Frolova L.A., Nigmatullin N.M., Nazarova L.B., Wetterich S., Schirrmeister L. Terrestrial environmental conditions during the Last Interstadial based on analysis of aquatic invertebrate communities from coastal exposures at the Dmitry Laptev Strait // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 358-361. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-358](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-358)

1. Introduction

In recent decades, climate change has emerged as a major global environmental concern. Various biological proxies have been employed as quantitative tools in paleoclimatology to deduce past temperature variations during the late Quaternary due to their temperature sensitivity (Frolova et al., 2014). Notably, subfossil Cladocera assemblages have been recognized as effective indicators of climate change (Nevalainen et al., 2012). The aim of this study was to examine the subfossil Cladocera community in lake sediments from Bol'shoy Lyakhovsky Island and Oyogos Yar (northern East Siberia) to reconstruct the paleoclimatic conditions of this region.

2. Materials and Methods

The study sites span along the Dmitry Laptev Strait on the southern coast of Bol'shoy Lyakhovsky Island and the opposite mainland coast of Oyogos Yar in northern Russia. Field studies were conducted on both sides of the Laptev Strait in 2002, 2007, and 2014. Cladoceran assemblages in the lacustrine deposits were investigated on Bol'shoy Lyakhovsky Island (L7-11) and in profiles Oya-3-11, Oy7-01, Oy7-08, Oya 5-1 on Oyogos Yar. The analysis of subfossil Cladocera was performed using the standard methodology (Korhola and Rautio, 2001).

*Corresponding author.

E-mail address: larissa.frolova@mail.ru (L.A. Frolova)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and Discussion

The fossil Cladocera remains were well-preserved and 13 taxa were identified in the composition of the thanatocoenoses. The most abundant taxa were *Chydorus* cf. *sphaericus*, *Bosmina* sp., and *Daphnia pulex* gr. In general, the community was dominated by littoral-benthic taxa (*C.* cf. *sphaericus*, *Alona guttata* / *Coronatella rectangula*). Here, Cladocera remains are more diverse and have much higher concentrations if compared to Bol'shoy Lyakhovsky, where *C.* cf. *sphaericus* dominated. Most Cladocera remains at Oyogos Yar belong to littoral phytophilous taxa closely associated with macrophytes. Furthermore, along with cold-water representatives, more southern thermophilic taxa have been discovered at Oyogos Yar. Specifically, findings of *Leydigia leydigi* indicate warmer-than-today conditions during the MIS 5e in the past. According to literature (Flossner, 2000), this species is absent in the Arctic-subarctic zones and is only found in the boreal zone. Currently, the distribution boundary of this taxon lies significantly further south than the location of our findings on the Laptev Sea coast (Frolova et al., 2020; Ibragimova et al., 2020).

4. Conclusions

Thus, the findings of Cladocera remains significantly north of their modern ranges allow us to reconstruct warmer climatic conditions during MIS 5e than present-day conditions. The data obtained from cladocera analysis are in good agreement with the results of chironomid analysis, which also reconstructs significantly higher-than-today mean July air temperatures (12.0-13.8°C) in MIS 5e for Oyogos Yar. Climatic and paleoecological conditions during MIS 5e in water bodies along the coast of Oyogos Yar were apparently more favorable for Cladocera on Bol'shoy Lyakhovsky Island. The composition of Cladocera taphocoenoses in Oyogos Yar indicate the presence of a well-developed littoral zone in paleolakes.

Acknowledgements

Cladoceran analysis was carried out within the framework of the Strategic Academic Leadership Program of Kazan Federal University (Priorities-2030).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Flossner D. 2000. Die Haplozoa und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers.
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Valieva E. et al. 2020. Cladoceran remains from the bottom sediments of the arctic lake Arkto-Pimberto in the Pechora River delta. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 4.1.*: 335-340 DOI:[10.5593/sgem2020/4.1/s19.042](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.042)
- Ibragimova A., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. The research of the Yamal peninsula lake bottom sediments by the implementation of subfossil cladocera assemblages' analysis. *Proceedings of 20th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM 4.1.*: 539-546 DOI:[10.5593/sgem2020/4.1/s19.067](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.067)
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)
- Nevalainen L., Luoto T.P., Kultti S. et al. 2012. Do subfossil Cladocera and chydorid ephippia disentangle Holocene climate trends? *The Holocene* 22: 291-299. DOI: [10.1177/0959683611423691](https://doi.org/10.1177/0959683611423691)

Наземные условия палеосреды в период последнего интерстадиала по данным анализа сообществ водных беспозвоночных отложений побережья пролива Дмитрия Лаптева

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYФролова Л.А.^{1,2}, Нигматуллин Н.М.¹, Назарова Л.Б.¹,
Веттерих С.^{3,4}, Ширрмайстер Л.³¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18²Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирская обл., Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 17³Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, Потсдам, Германия⁴Институт географии, Технический университет Дрездена, Дрезден, Германия

АННОТАЦИЯ. Впервые были получены данные о составе кладоцерных сообществ донных отложений озер, существовавших на острове Большой Ляховский и Ойгосском Яру на побережье пролива Дмитрия Лаптева в период последнего крупного межледниковья (МИС 5е, 124-119 тыс. лет назад). В составе тафоценозов идентифицированы 13 таксонов Cladocera. Состав сообщества Cladocera Ойгосского Яра указывает на развитую литоральную зону в палеоозерах, большинство остатков принадлежит литорально-фитофильным таксонам, связанным с макрофитами. В сообществах Ойгосского Яра обнаружены как холодноводные, так и теплолюбивые таксоны, например, *Leydigia leydigi*. Найденные остатки Cladocera севернее современных ареалов указывают на более тёплый климат в период МИС 5е. Данные по Cladocera согласуются с результатами хирономидного анализа.

Ключевые слова: остров Большой Ляховский, Ойгосский Яр, МИС 5е, Cladocera, *Leydigia leydigi*

Для цитирования: Фролова Л.А., Нигматуллин Н.М., Назарова Л.Б., Веттерих С., Ширрмайстер Л. Наземные условия палеосреды в период последнего интерстадиала по данным анализа сообществ водных беспозвоночных отложений побережья пролива Дмитрия Лаптева // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 358-361. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-358

1. Введение

В последние десятилетия изменение климата стало серьезной глобальной экологической проблемой. В палеоклиматологии используются различные биологические индикаторы в качестве количественных инструментов для определения изменений температуры в позднечетвертичный период, поскольку они чувствительны к температуре (Frolova et al., 2014). В частности, субфоссильные сообщества кладоцер были признаны эффективными индикаторами изменения климата (Nevalainen et al., 2012). Целью этого исследования было изучение сообщества субфоссильных Cladocera в озерных отложениях на острове Большой Ляховский и Ойгосский Яр (север Восточной Сибири) для реконструкции палеоклиматических условий этого региона.

2. Материал и методы

Район исследования расположен вдоль пролива Дмитрия Лаптева на южном побережье острова Большой Ляховский и на противоположном материковом побережье Ойгосского Яра на севере России. Полевые исследования были проведены по обе стороны пролива Лаптевых в 2002, 2007 и 2014 годах. Сообщества кладоцер в озерных отложениях были исследованы на острове Большой Ляховский (L7-11) и в профилях Оуа-3-11, Оу7-01, Оу7-08, Оуа 5-1 на Ойгосском Яре. Анализ субфоссильных Cladocera был выполнен по стандартной методике (Korhola and Rautio, 2001).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: larissa.frolova@kpfu.ru (Л.А. Фролова)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



3. Результаты и обсуждения

Ископаемые остатки кладоцер донных отложений на острове Большой Ляховский и Ойгосский Яр отличались хорошей степенью сохранности. В составе тафоценозов идентифицированы остатки 13 таксонов Cladocera. Наиболее высокой численностью выделались таксоны *Chydorus cf. sphaericus*, *Bosmina* sp. and *Daphnia pulex* gr. В сообществе преобладали литорально-бентосные таксоны (*C. cf. sphaericus*, *Alona guttata* / *Coronatella rectangular*). В водоемах на острове Б. Ляховский зафиксированы низкие концентрации остатков ветвистоусых ракообразных при доминировании *C. cf. sphaericus*. Находки кладоцер в палеоозерах на Ойгосском Яру более разнообразны и имеют гораздо более высокие концентрации. Большинство остатков ветвистоусых ракообразных Ойгосского Яра относятся к литоральным фитофильным таксонам, тесно связанным с макрофитами. В сообществах кладоцер Ойгосского Яра наряду с холодноводными представителями обнаружены и более южные теплолюбивые таксоны, в частности, находки вида *Leydigia leidigi* на побережье Ойгосского Яра указывают на более теплые условия в МИС 5е в прошлом. По литературным данным (Flossner, 2000), этот вид отсутствует в аркто-субарктических зонах и представлен лишь в бореальной зоне. Граница распространения данного таксона в настоящее время проходит значительно южнее места нашей находки остатков на побережье моря Лаптевых (Frolova et al., 2020; Ibragimova et al., 2020).

4. Выводы

Таким образом, находки остатков Cladocera значительно севернее их современных ареалов позволяют реконструировать более теплые климатические условия в период МИС 5е, чем современные. Данные, полученные по кладоцера хорошо согласуются с результатами хирономидного анализа, по которому для Ойгосского Яра так же реконструированы значительно более высокие показатели среднеиюльской температуры воздуха, чем в настоящее время (12.0-13.8°C). Климатические и палеоэкологические условия в период МИС 5е в водоемах на побережье Ойгосского Яра видимо были благопри-

ятнее для ветвистоусых ракообразных, чем в палеоозерах острова Б. Ляховского. Составы тафоценозов Cladocera Ойгосского Яра свидетельствуют о наличии хорошо развитой литоральной зоны в палеоозерах.

Благодарности

Кладоцерный анализ выполнен в рамках программы «Приоритет 2030» Казанского федерального университета.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Flossner D. 2000. Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas. Leiden: Backhuys Publishers.
- Frolova L., Nazarova L., Pestryakova L. et al. 2014. Subfossil Cladocera from surface sediment in thermokarst lakes in northeastern Siberia, Russia, in relation to limnological and climatic variables. *Journal of Paleolimnology* 52: 107-119. DOI: [10.1007/s10933-014-9781-7](https://doi.org/10.1007/s10933-014-9781-7)
- Frolova L., Nigmatullin N., Valieva E. et al. 2020. Cladoceran remains from the bottom sediments of the arctic lake Arkto-Pimberto in the Pechora River delta. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM* 4.1.: 335-340 DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.042](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.042)
- Ibragimova A., Frolova L., Nigmatullin N. et al. 2020. The research of the Yamal peninsula lake bottom sediments by the implementation of subfossil cladocera assemblages' analysis. *Proceedings of 20th International multidisciplinary scientific Geoconference, SGEM* 4.1.: 539-546 DOI: [10.5593/sgem2020/4.1/s19.067](https://doi.org/10.5593/sgem2020/4.1/s19.067)
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)
- Nevalainen L., Luoto T.P., Kultti S. et al. 2012. Do subfossil Cladocera and chydorid ephippia disentangle Holocene climate trends? *The Holocene* 22: 291-299. DOI: [10.1177/0959683611423691](https://doi.org/10.1177/0959683611423691)

Classification of lakes of the Indigirka River basin and their current state



Levina S.N.*, Pestryakova L.A.

North-Eastern Federal University, Belinsky, 58, Yakutsk, 677000, Russia

ABSTRACT. Currently, classification plays an important role and importance as a method of scientific cognition and is one of the mandatory attributes in the knowledge of the world. Classification or typification are ways of grouping objects of research or observation according to their common characteristics. Currently, there are many different classifications in the scientific literature according to one or another feature, most of which are single-criteria or developed for a specific region. This paper presents the development of a regional ecological and limnological classification of the lakes of Yakutia on the example of the Indigirka River basin (RELK) according to the leading parameters (geographical, physico-chemical and hydrobiological). The development of the classification made it possible to study a large amount of factual material on the lakes of the Indigirka River basin, as a result of which data on the current state of the lakes of the poorly studied limnological region of the study were obtained.

Keywords: RELK, lake, diatoms, Indigirka, Yakutia, diatom complexes, morphometric parameters, hydrochemical parameters

For citation: Levina S.N., Pestryakova L.A. Classification of lakes of the Indigirka River basin and their current state // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 362-367. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-362

1. Introduction

The Indigirka River basin is one of the largest rivers in Yakutia, which originates on the northern slopes of the Khalkan range and flows into the East Siberian Sea, flowing in the field of development of permafrost rocks is still poorly studied in limnological terms. In this regard, there is a high urgency to study the individual characteristics and characteristics of the water bodies of the study area.

The aim of the work is to study the morphometric, physico-chemical parameters and characteristics of diatoms of the lakes of the Indigirka River basin and to develop the RELK of the lakes of Yakutia on the example of the studied water bodies.

The results obtained during the study can provide new data on water quality and the current state of reservoirs in the Indigirka River basin, and can be applied in conducting water management and environmental protection measures in Yakutia.

2. Material and Methods

The research area is the poorly studied, lake-rich basin of the Indigirka River. The object of the study is 42 lakes of different types, the bulk is located on the flat territories of the Yano-Indigir lowland, the absolute heights above sea level vary from 4 to 596 m (Momsky ridge) (Fig.). The studied lakes were divided into groups by type of origin (thermokarst, water-erosion, erosion-thermokarst, glacial) and by vegetation subzones (subarctic tundra, forest tundra, northern taiga). The actual research material was collected during field expeditionary work in the period 2006-2019 using standard sampling and material processing methods described in the authors' works (Gorodnichev et al., 2015). Diatom analysis of the upper unconsolidated layer (0-1 cm) of lake sediments was performed using a generally accepted quantitative method (General patterns..., 1986). A bioindication assessment of the current state of water quality in the lakes

*Corresponding author.

E-mail address: levina_sardan@mail.ru (S.N. Levina)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



of the Indigirka River basin was carried out using the Pantle-Bucca method in the modification of Sládeček (Sládeček, 1973).

3. Results and Discussion

According to the results of the study, the area of the water mirror of the lakes of the Indigirka River basin varies widely from 0.003 to 157 km², most of the lakes of the subarctic tundra turned out to be small and small, the northern taiga is also small, the lakes of the forest tundra are medium (Ivanov, 1948), most of all lakes 74% have a very shallow depth (Kitaev, 2007). 64% of the studied lakes have a basin shape close to rounded. The water of lakes of all groups is characterized by a predominance of a slightly alkaline environment, according to the total water hardness, 95% of lakes have “very soft” waters, and all are ultra-fresh. According to the classification of O.A. Alekin (Alekin, 1970), lake water is represented by a predominance of waters of the bicarbonate class of the magnesium group (50%) and calcium (28%).

The diatom flora of the lakes is represented by 257 species (including 4 varieties) belonging to 75 genera, 30 families and 3 classes of Bacillariophyta. There are 32 dominant species in the studied lakes (12% of the total number of species), 41 subdominant (16%). Of these, the most active and permanent species were: *Staurosira venter* (found as a dominant in 50% of lakes), *Staurosirella pinnata* (in 29%) and *Tabellaria flocculosa* (in 25%). All three types are typical mass types of reservoirs in Yakutia. Of these, *Tabellaria flocculosa* is characteristic of peat bogs and moss pads of the North and mountains. A more detailed description of the modern composition of diatom complexes is presented in the author’s early work (Levina et al., 2022). Bioindication assessment of water quality showed that the lakes of the Subarctic territories and the northern taiga turned out to be “clean” (class II) in terms of pollution. For the lakes of the forest tundra, the water quality class belongs to the third, and the reservoirs turned out to be moderately polluted (class III).

4. Conclusions

Thus, a large amount of data on the abiotic and biotic parameters of lakes obtained during the study made it possible to develop and propose a RELK for the lakes of Yakutia using the example of the Indigirka basin. When creating the RELK, existing classifications were taken into account (Levina and Pestryakova, 2023), the structure of the RELC includes 3 parameters (geographical, physico-chemical and hydrobiological), 18 signs and 106 indicators. A designation code was attached to each feature for the convenience of processing a large amount of data and using it for statistical processing on computer programs. The classification of 42 lakes of the Indigirka River basin made it possible to identify the following three predominant classes:

I. E11 G9 A3 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(3) Ph4 Th5 Si3 is a glacial lake located at a very low altitude above sea level, medium in area, with very shallow

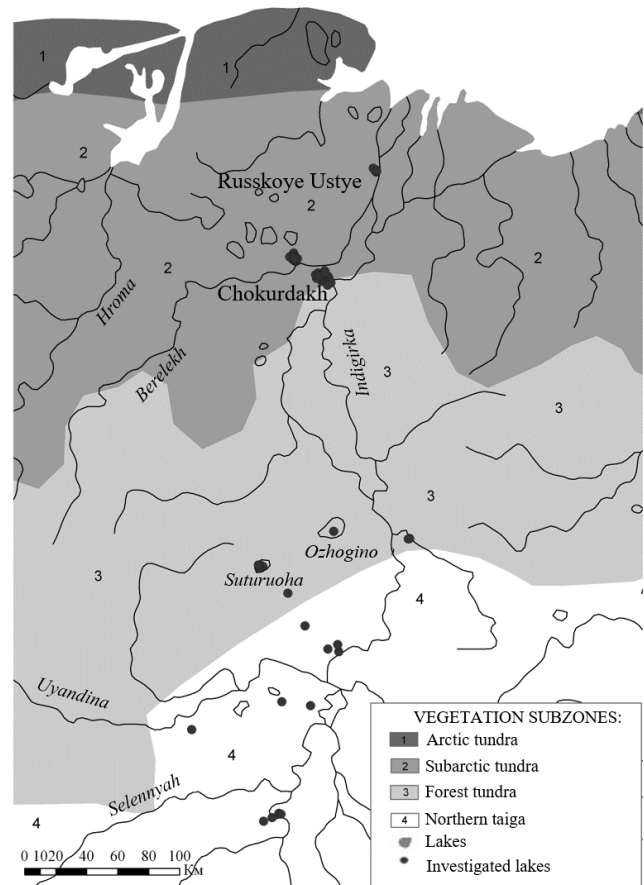


Fig. The map of the location of the studied lakes.

depth, rounded, close to a circle shape, with moderate and clear water, with very low mineralization, slightly alkaline, with sodium bicarbonate very soft water, with beta-mesosaprobic zone (lakes of glacial origin of the forest tundra and northern taiga);

II. E11 G1 A5 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(1) Ph4 Th5 Si2 is a thermokarst lake, located at a very low altitude above sea level, small in area, with very shallow depth, rounded, close to a circle shape, with moderate and clear water, with very low mineralization, slightly alkaline, with bicarbonate-very soft calcium water, with an oligosaprobe zone (most thermokarst lakes of the Subarctic tundra and northern taiga);

III. E11 G3 A4 D5 K4 L3 T3 Ts1 M2 I2(3) Ph5 Th5 Si2 is an erosive thermokarst lake, located at a very low altitude above sea level, small in area, with shallow depth, rounded, close to oval shape, with warm and transparent water, with low mineralization, slightly alkaline, with sulfate-sodium very soft water, with an oligosaprobe zone (most lakes of the forest tundra).

Thus, the structure of the developed RELK helps to identify individual classes of lakes to solve specific problems of lake nature management, including the use of lake resources.

Acknowledgements

The study was supported by the project part of the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation №FSRG-2023-0027.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

Alekin O.A. 1970. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad : Hydrometeoizdat, pp. 444. (in Russian).

General patterns of occurrence and development of lakes. Methods of studying lakes. 1986. In: Kvasov D.D. (Ed.). Leningrad, Nauka, Series: History of lakes of the USSR, pp. 256. (in Russian).

Gorodnichev R.M., Pestryakova L.A., Yadrikhinsky I.V. 2015. Interrelations of diatoms with morphometric, hydrochemical characteristics and location parameters of lakes in the North of Yakutia. *Vestnik NEFU*. 6 (50). pp. 14-26. (in Russian).

Ivanov P.V. 1948. Classification of lakes of the world by size and by their average depth. *Bulletin of Leningrad State University*. Leningrad, 20, pp. 29-36. (in Russian).

Kitaev S.P. 2007. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk : Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 395. (in Russian).

Levina S.N., Davydova P.V., Gorodnichev R.M. et al. 2022. Assessment of the current state of the lakes of the lower reaches of the Indigirka River (established on the basis of diatom analysis). In: Subetto D.A., Paranina A.N. (Ed.), *Geography: the development of science and education : A collection of articles based on the materials of the annual international scientific and practical conference dedicated to the 225th anniversary of Herzen University*. In 2 volumes, St. Petersburg, April 20-23, 2022. Volume I. St. Petersburg: A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, pp. 96-100. (in Russian).

Levina S.N., Pestryakova L.A. 2023. Development of the geocological classification of the lakes of Yakutia (on the example of the Indigirka River basin). In: *Geology and Mineral resources of the North-East of Russia : Materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation dedicated to the 30th anniversary of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) and the 40th anniversary of the Geological Exploration Faculty of the M.K. Ammosov NEFU, Yakutsk, March 21-24, 2023*. Yakutsk: Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, pp. 471-475 (in Russian).

Sládeček V. 1973. System of water quality from the biological point of view. Stuttgart, Schweizerbart, pp. 218.

Классификация озер бассейна реки Индигоирка и их современное состояние



Левина С.Н. *, Пестрякова Л.А.

СВФУ им. М.К. Аммосова, ул. Беллинского, 58, Якутск, 677000, Россия

АННОТАЦИЯ. В настоящее время классификация играет важную роль и значение как метод научного познания и является одним из обязательных атрибутов в познании мира. Классификация или типизация – это способы группировки объектов исследования или наблюдения в соответствии с их общими признаками. В настоящее время в научной литературе существует множество различных классификаций по тем или иным признакам, большинство из которых являются однокритериальными или разработанными для определенного региона. В данной работе представлена разработка региональной эколого-лимнологической классификации озер Якутии на примере бассейна реки Индигоирка (РЭЛК) по ведущим параметрам (географический, физико-химический и гидробиологический). Разработка классификации позволила изучить большой объем фактического материала по озерам бассейна реки Индигоирка, в результате которого получены данные о современном состоянии озер слабоизученного в лимнологическом плане региона исследования.

Ключевые слова: РЭЛК, озеро, диатомовые водоросли, Индигоирка, Якутия, диатомовые комплексы, морфометрические параметры, гидрохимические параметры

Для цитирования: Левина С.Н., Пестрякова Л.А. Классификация озер бассейна реки Индигоирка и их современное состояние // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 362-367. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-362

1. Введение

Бассейн реки Индигоирка является одной из крупнейших рек Якутии, которая берет начало на северных склонах Халканского хребта и впадает в Восточно-Сибирское море, протекая в области развития многолетнемерзлых горных пород все еще остается слабоизученной в лимнологическом плане. В связи с этим возникает высокая актуальность изучения индивидуальных признаков и особенностей водных объектов района исследования.

Целью работы является изучение морфометрических, физико-химических параметров и характеристик диатомовых водорослей озер бассейна реки Индигоирка и разработка РЭЛК озер Якутии на примере исследованных водных объектов.

Полученные в ходе исследования результаты могут внести новые данные о качестве воды и современном состоянии водоемов бассейна реки Индигоирка, могут быть применены при проведении водохозяйственных и природоохранных мероприятий на территории Якутии.

2. Материалы и методы

Районом исследования является слабоизученный, богатый озерами бассейн реки Индигоирка. Объект исследования – 42 разнотипных озера, основная масса расположена на равнинных территориях Яно-Индигоирской низменности, абсолютные высоты над уровнем моря варьируют от 4 до 596 м (Момский хребет) (Рис.). Изученные озера были разделены на группы по типу происхождения (термокарстовые, водно-эрозионные, эрозионно-термокарстовые, ледниковые) и по растительным подзонам (субарктическая тундра, лесотундра, северной тайга). Фактический материал исследования был собран во время полевых экспедиционных работ в период 2006–2019 гг. с использованием стандартных методов отбора проб и обработки материала, описанных в работах авторов (Городничев и др., 2015). Диатомовый анализ верхнего неконсолидированного слоя (0–1 см) озерных осадков был выполнен по общепринятой количественной методике (Общие закономерности..., 1986). С применением метода Пантле-Букка в модификации

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: levina.sardan@mail.ru (С.Н. Левина)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Сладечка (Sládeček, 1973) проведена биоиндикационная оценка современного состояния качества воды озер бассейна реки Индигирка.

3. Результаты и обсуждение

По результатам исследования площадь водного зеркала озер бассейна реки Индигирка варьирует в широких пределах от 0,003 до 157 км², большинство озёр субарктической тундры оказались малыми и небольшими, северной тайги также небольшими, озера лесотундры являются средними (Иванов, 1948), большая часть всех озер 74 % обладает очень малой глубиной (Китаев, 2007). 64 % исследованных озер имеют форму котловины близкой к округлой. Вода озер всех групп характеризуется преобладанием слабощелочной среды, по общей жесткости воды 95 % озер имеют «очень мягкие» воды, и все являются ультрапресными. По классификации О.А. Алекина (Алекин, 1970) вода озер представлена преобладанием вод класса гидрокарбонатных группы магниевых (50 %) и кальциевых (28 %).

Диатомовая флора озер представлена 257 видами (в т.ч. 4 разновидности), относящимися к 75 родам, 30 семействам и 3 классам Bacillariophyta. В изученных озерах насчитывается 32 доминантных вида (12 % от общего числа видов), 41 – субдоминант (16 %). Из них самыми активными и постоянными оказались виды: *Staurosira venter* (встречается как доминант в 50 % озер), *Staurosirella pinnata* (в 29 %) и *Tabellaria flocculosa* (в 25 %). Все три вида – типичные массовые виды водоемов Якутии. Из них *Tabellaria flocculosa* характерен для торфяных болот и моховых подушек Севера и гор. Более подробное описание современного состава диатомовых комплексов представлено в ранней работе автора (Левина и др., 2022). Биоиндикационная оценка качества вод показала, что озера субарктических территорий и северной тайги по уровню загрязненности оказались «чистыми» (II класс). Для озер лесотундры класс качества вод относится к третьему, а водоемы оказались умеренно загрязненными (III класс).

4. Заключение

Таким образом, большой объем данных по абиотическим и биотическим параметрам озер, полученных в ходе исследования, позволил разработать и предложить РЭЛК для озер Якутии на примере бассейна Индигирка. При создании РЭЛК учитывались существующие классификации (Левина и Пестрякова, 2023), структура РЭЛК включает 3 параметра (географический, физико-химический и гидробиологический), 18 признаков и 106 показателей. Каждому признаку был прикреплен код обозначения для удобства обработки большого объема данных и применения для статистической обработки на компьютерных программах. Классификация 42 озер бассейна реки Индигирка позволила выделить три следующих преобладающих класса:

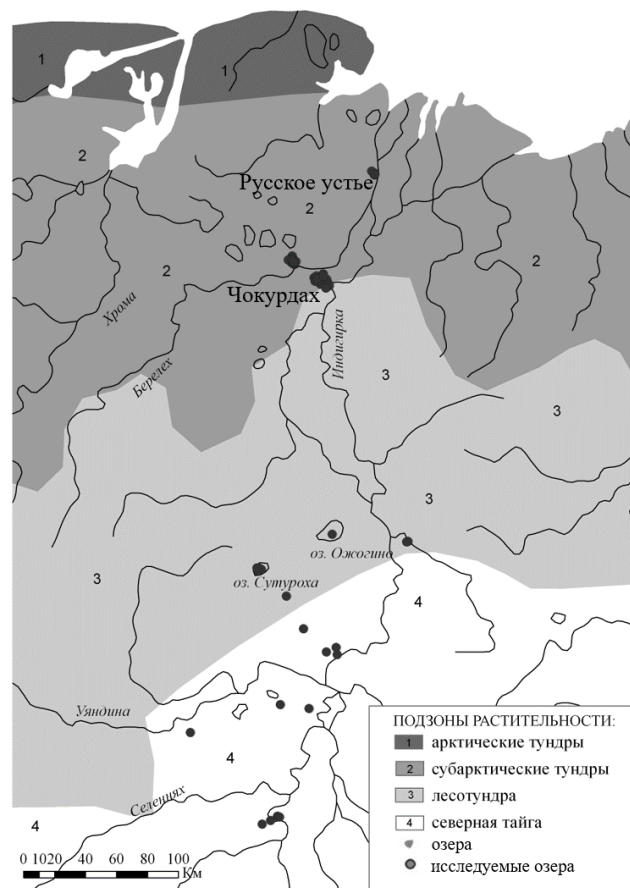


Рис. Карта-схема расположения исследуемых озёр

I. E11 G9 A3 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(3) Ph4 Th5 Si3 – ледниковое озеро, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, среднее по площади, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с гидрокарбонатно-натриевой очень мягкой водой, с бета-мезосапробной зоной (озёра ледникового происхождения лесотундры и северной тайги);

II. E11 G1 A5 D6 K5 L3 T2 Ts1 M1 I1(1) Ph4 Th5 Si2 – термокарстовое озеро, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, малое по площади, с очень малой глубиной, округлое, близкой к кругу формы, с умеренной и прозрачной водой, с очень малой минерализацией, слабощелочное, с гидрокарбонатно-кальциевой очень мягкой водой, с олигосапробной зоной (большинство термокарстовых озер субарктической тундры и северной тайги);

III. E11 G3 A4 D5 K4 L3 T3 Ts1 M2 I2(3) Ph5 Th5 Si2 – эрозионно-термокарстовое озеро, расположено на очень низкой высоте над уровнем моря, небольшое по площади, с малой глубиной, округлое, близкой к овалу формы, с теплой и прозрачной водой, с малой минерализацией, слабощелочное, с сульфатно-натриевой очень мягкой водой, с олигосапробной зоной (большинство озёр лесотундры).

Таким образом, структура разработанной РЭЛК помогает выявить отдельные классы озёр для решения конкретных задач озёрного природопользования, в том числе по использованию озёрных ресурсов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки РФ № FSRG-2023-0027.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Алекин О. А. 1970. Основы гидрохимии. Ленинград : Гидрометеиздат, С. 444.

Городничев Р. М., Пестрякова Л. А., Ядрихинский И. В. 2015. Взаимосвязи диатомовых водорослей с морфометрическими, гидрохимическими характеристиками и параметрами местоположения озер Севера Якутии. Вестник СВФУ. 6(50). С. 14–26.

Иванов П. В. 1948. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине. Бюллетень ЛГУ, 20; С. 29–36.

Китаев С. П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов – Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, С. 395.

Левина С. Н., Давыдова П. В., Городничев Р. М. и др. 2022. Оценка современного состояния озер низовья реки Индигирка (установленное на основе диатомового анализа). География: развитие науки и образования : Сборник статей по материалам ежегодной международной научно-практической конференции к 225-летию Герценовского университета. В 2-х томах, Санкт-Петербург, 20–23 апреля 2022 года. Отв. редакторы Д.А. Субетто, А.Н. Паранина. Том I. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена – С. 96-100.

Левина С. Н., Пестрякова Л. А. 2023. Разработка геоэкологической классификации озёр Якутии (на примере бассейна реки Индигирка). Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России : Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 30-летию Академии наук Республики Саха (Якутия) и 40-летию геологоразведочного факультета СВФУ им. М.К. Аммосова, Якутск, 21–24 марта 2023 года. Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, С. 471-475.

Общие закономерности возникновения и развития озер. Методы изучения озер. 1986. Серия: История озер СССР. Отв. редактор Д.Д. Квасов. Ленинград, Наука, 256 с.

Sládeček V. 1973. System of water quality from the biological point of view. Stuttgart, Schweizerbart, 218 p.

Lake sedimentation conditions in the lower part Seyda River (north of Komi Republic, Russia) according to palynological and diatom data

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Golubeva Yu.V.* , Marchenko-Vagapova T.I.

Institute of Geology named N.P. Yushkin, Federal Research Center «Komi Scientific Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Pervomayskaya Str., 54, Syktyvkar, 167982, Russia

ABSTRACT. The aim of the study is to investigate sedimentation processes during the Late Glacial and Holocene in the eastern Bolshezemelskaya Tundra. The coastal outcrop SD-5, 16 m high, in the lower reaches of the Seyda River (Komi Republic) was studied. Analytical methods included palynological and diatom analysis, and ^{14}C dating. When characterizing the stages of sediment formation, algae *Pediastrum*, Desmidiaceae, and other non-pollen palynomorphs were also identified. The lithological structure of the outcrop and the results obtained made it possible to trace the transformations of the periglacial paleo-reservoir and the four main stages of sedimentation associated with them. The banded clay at its base was deposited in a periglacial lake under periglacial conditions. The overlying layer of interbedded sands accumulated as a result of the descent of the periglacial paleo-reservoir. The peat exposed in the roof of the section was initially formed ($12125 \pm 49 - 8719 \pm 44$ ^{14}C BP) in a cold deep-water lake that arose in place of a periglacial reservoir. The vegetation cover consisted of yernik and wormwood-chenopodium thickets. Later (up to ~ 4500 ^{14}C BP) the shallows were overgrown with wetland plants. The improvement of the climate contributed to the advance of birch and later (7705 ± 43 ^{14}C BP) spruce forests. Then, starting from ~ 4500 ^{14}C BP, the swamp massif drained and froze, and modern plant communities developed.

Keywords: Bolshezemelskaya tundra, late glacial, Holocene, pollen and non-pollen palynomorphs, diatoms

For citation: Golubeva Yu.V., Marchenko-Vagapova T.I. Lake sedimentation conditions in the middle Seyda River (north of Komi Republic, Russia) according to palynological and diatom data // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 368-373. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-368

1. Introduction

Interest in paleogeographic studies within the Bolshezemelskaya Tundra is determined by the very wide distribution of periglacial paleobasins. Thus, large lakes that formed during the retreat of the Valdai glaciers and continued to exist in the Holocene were confined to the Kolvinskaya, Kosyu-Rogovskaya and Lemvinskaya depressions. In the middle reaches of the Usa River, ribbon clays were deposited in lake basins (Kvasov, 1975). The data of palynological and diatom analyses of such objects make it possible to reconstruct the processes of sedimentation during the transition from the late Neopleistocene to the Holocene and the Holocene. The results of analyses of periglacial lake formations on the Kola Peninsula (Tolstobrova et al., 2023), Karelia (Shelekhova, 1995) and in the Northern Dvina basin (Zaretskaya et al., 2023) have been published. The distribution features of *Pediastrum* algae

in sediments were noted by L.V. Filimonova (2014) during reconstructions of bog development in Karelia and V. Yankovska (2008) in the Urals. V.A. Isakov reconstructed the configuration of the periglacial basin in the Seyda Valley, formed during the degradation of the Valdai glaciation, using the ArcticDem digital relief model. According to it, the marginal part of the paleo-reservoir was exposed in the outcrop we studied (Isakov, 2023).

2. Materials and methods

The studies were in the coastal outcrop SD-5 ($67^{\circ}18'03.83''\text{N}$, $62^{\circ}53'05.66''\text{E}$) in the lower reaches of the Seyda River (Vorkuta District of the Komi Republic). Diatom and palynological analyses were performed with a sampling step of 10 cm from varved clay and 5 cm from peat. Microscopy of pollen preparations also

*Corresponding author.

E-mail address: vygolubeva@geo.komisc.ru (Yu.V. Golubeva)

Received: June 12, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



identified the algae *Pediastrum*, Desmidiaceae and other non-pollen palynomorphs. Radiocarbon dating of six samples was carried out at the IG RAS (Moscow) and NSU (Novosibirsk).

3. Results and discussion

At the base of the section lies a 9-meter thick layer composed of frozen gray with a bluish tint, banded clay with interlayers 1-4 mm thick. It is observed from the water's edge, but its upper part was accessible for sampling. Higher up the section is a 4-meter-thick sand pack overlain by 3-meter-thick peat. Micropaleontological remains were identified in 20 banded clay samples and 24 peat samples. They were not found in the sandy layer separating them. Four stages of sedimentation were identified based on the composition of pollen spectra and diatom complexes in combination with the features of the lithological structure of sediments.

3.1. Sedimentation in a proglacial lake

Band clay: 1100-940 cm. The spore-pollen complex is dominated by pollen of dwarf birches (up to 80%), wormwood (up to 77%) and goosefoot (up to 33%). The presence of numerous microparticles of coal, fragments and single valves of diatoms *Parallia sulcata*, other centric algae, spicules, silicoflagellates with a large proportion of pre-Quaternary pollen (up to 87%) is due to their transportation by the ice sheet. Earlier, similar composition of palynomorphs from band clays, indicating severe climatic conditions, were identified by M.P. Grichuk and V.P. Grichuk (1960), T.I. Smirnova (1966), L.B. Lavrova et al. (2011) and others.

Higher in the section (940-910 cm) the sediments contain a silt component, and among the micropaleontological remains only single specimens of spores, pollen and testate amoebae of the freshwater species *Diffugia schurmanii* and *Cucurbitella dentata* were found.

A member of alternating gray and dark gray fine-grained sands (910-300 cm) probably accumulated during a sharp decrease in the level of the periglacial reservoir and belongs to the coastal lake facies. The descent of the periglacial basins in the Pechora basin occurred as a result of the retreat of the Valdai glaciers. According to D.D. Kvasov (1975), the large lakes of the Bolshezemelskaya tundra, with the exception of Nizhne-Pechora Lake, received runoff to the south and southeast, since in the north this was blocked by a glacier.

3.2. Isolated lake that formed in the site of a proglacial lake

The beginning of peat formation is dated to 12125 ± 49 ^{14}C BP (AMS, GV 04522). In its lower part (300-205 cm), the content and diversity of pollen increases. At the same time, in most samples attributed to this stage of sedimentation, pollen of dwarf birch (up to 53%), wormwood (up to 29%) and goosefoot (up to 12%) still dominates. Only in two spectra (210-205 cm), reflecting the final stage of the lake existence

(8719 ± 44 ^{14}C BP, AMS, GV 04523), the proportion of tree birch pollen increases (28-56%) and the proportion of xerophilic grass pollen sharply decreases. Noteworthy is the appearance of *Pediastrum* algae, typical of reservoirs with transparent water, among the non-pollen palynomorphs. The cryophile *Pediastrum integrum* predominates among them. *P. boryanum* var. *boryanum* and *P. var. rugulosum*, which prefer higher summer temperatures, were also found. Similar complexes of *Pediastrum* algae were found by L.V. Filimonova in the sediments of a periglacial paleolake in the Tolvoyarvi Nature Reserve in Karelia (2014). The presence of desmid algae *Cosmarium* in the algal flora and an increase in their proportion up to 10% higher in the section indicate the development of swampy areas in the vicinity of the lake. The species diversity and abundance of freshwater diatoms, mainly benthic forms, significantly increase. The presence of valves of *Denticulatenius* var. *crassula*, *Diatoma hiemale* var. *mesodon*, *Didymosphenia geminata*, *Eucoconeis flexella*, *P. lata* indicates the conditions of a shallow oligotrophic reservoir with cold, clear, oxygen-rich and nutrient-poor water.

3.3. Lake swamping

The final stage of sedimentation is identified in peat sediments in the 205-0 cm interval. Pollen spectra are characterized by a decrease in the participation of dwarf birch pollen (5-25%) due to an increase in the amount of tree pollen: first, woody birch (8-45%) and later, spruce (3-14%). An increase in the proportion of aquatic herbaceous plants (*Typha latifolia*, *Potamogeton*, *Menyanthes trifoliata*) and desmid algae (*Cosmarium* up to 19%, single *Euastrum* and *Staurastrum*) in the 205-175 cm interval reflects the overgrowing of the lake. This is supported by a decrease in the number and diversity of diatoms, as well as the disappearance of *Pediastrum* algae. In the sediments of the roof of the section (~ 5000 ^{14}C years BP to the present, 65-0 cm), the palynomorphs are dominated by *Betula nana* (26%), Vacciniaceae (16%) and Ericales (27%); algal flora was not found.

4. Conclusions

The lithological structure of the outcrop allows us to correlate the formation of the exposed varved clay deposits at its base in the conditions of a periglacial lake. The composition of the spore-pollen spectrum indicates a periglacial environment with a predominance of wormwood-chenopodium and yernik thickets in the vegetation cover. The overlying sandy layer in the depth range of 910-300 cm probably accumulated during the reduction of the area occupied by the periglacial basin. In the time range of $12125 \pm 49 - 8719 \pm 44$ ^{14}C BP, sedimentation occurred in a lake formed in the place of a periglacial lake. This is evidenced by the finds of *Pediastrum* algae in peat samples and the abundance of freshwater diatoms, typical of reservoirs with transparent water. The presence of *P. boryanum* var. *boryanum* and *P. duplex* var. *rugulo-*

sum among them records the warming of the lake water and the increase in summer temperatures. The vegetation cover of the adjacent territory consisted of birch and alder shrub thickets and wormwood-chenopodium associations. Later, up to ~ 4500 ^{14}C BP, sediments accumulated in the conditions of a shallow freshwater swampy reservoir, as indicated by a significant reduction in the species diversity and number of diatom specimens, the disappearance of *pediastrum* algae, and, on the contrary, a slight increase in the proportion of desmid algae, which prefer an oxidizing environment. Improvement of climatic conditions ~ 9000 ^{14}C BP contributed to the spread of birch and later (7705 ± 43 ^{14}C BP) spruce forests. Then, from ~ 4500 ^{14}C BP, the swamp was drained and modern plant communities of permafrost peat massifs from lingonberry-heather and dwarf birch thickets developed, which was facilitated by gradual climate cooling.

5. Acknowledgments

During the research was used the equipment of the Geoscience Center of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation. Project No. 23-27-00281.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Filimonova L.V. 2014. History of vegetation in the late glacial and Holocene on the territory of the Tolvoyarvi nature reserve (Karelia). Proceedings of the Karelian Scientific Center 2: 3-13. (In Russian)
- Isakov V.A. 2023. Geological and geomorphological zoning of the Seyda River basin based on the ArcticDEM digital elevation model. Herald of Geosciences 10 (346): 42-50. (In Russian)
- Jankovska V., Andreev A.A., Panova N.K. 2008. Holocene environmental history on the eastern slope of the Polar Ural Mountains, Russia. *Boreas* 35(4): 650-661. DOI:[10.1111/j.1502-3885.2006.tb01171.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2006.tb01171.x)
- Kvasov D.D. 1975. Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. Leningrad: Nauka. (In Russian)
- Lavrova N.B., Kolka V.V., Korsakova O.P. 2011. Some features of the palynospectra of bottom sediments of small lakes in the northern part of the Belomorskaya lowland. *Geology and Useful Fossils of Karelia* 14: 197-202. (In Russian)
- Shelekhova T.S. 1995. Diatom flora of Holocene sediments of small lakes in North-West Karelia. Ecology and geography of diatoms [materials of the school on diatoms] 6: 73-74. (In Russian)
- Tolstobrova A.N., Tolstobrov D.S., Korsakova O.P. 2023. Conditions of formation of lake sediments in the Voronya River valley (Kola Peninsula) according to diatom analysis. Proceedings of the Fersman Scientific Session 20: 218-221. (In Russian)
- Zaretskaya N., Utkina A., Baranov D. et al. 2023. Limited extension of the MIS 2 proglacial lake in the Severnaya Dvina valley, south-eastern margin of the last Scandinavian Ice Sheet. *Journal of Quaternary Science*: 1-20. DOI:[10.1002/jqs.3570](https://doi.org/10.1002/jqs.3570)

Условия озерного осадконакопления в низовье р. Сейды (север Республики Коми, Россия) по данным палинологического и диатомового анализов

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Голубева Ю.В.*, Марченко-Вагапова Т.И.

Институт геологии, Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», Первомайская ул., 54, Сыктывкар, 167982, Россия

АННОТАЦИЯ. Целью исследования является изучение процессов седиментации на протяжении позднеледниковья и голоцена на востоке Большеземельской тундры. Изучено береговое обнажение СД-5 высотой 16 м в низовье р. Сейды (Республика Коми). Аналитические методы включали палинологический и диатомовый анализы, датирование по ^{14}C . При характеристике этапов формирования осадков также идентифицировались водоросли *Pediastrum*, *Desmidiaceae* и другие непыльцевые палиноморфы. Литологическое строение обнажения и полученные результаты позволили проследить трансформации приледникового палеоводоёма и четыре связанные с ними основные этапы седиментации. Ленточная глина в его основании осаждалась в приледниковом озере в перигляциальных условиях. Вышезалегающая пачка переслаивания песков накапливалась в результате спуска приледникового палеоводоёма. Вскрытый в кровле разреза торф образовывался сначала ($12125 \pm 49 - 8719 \pm 44$ ^{14}C л.н.) в холодном глубоководном озере, возникшем на месте приледникового водоёма. Растительный покров состоял из ерниковых и полынно-маревых ассоциаций. Далее (до ~ 4500 ^{14}C л.н.) мелководья зарастали водно-болотными растениями. Улучшение климата способствовало продвижению березовых и позднее (7705 ± 43 ^{14}C л.н.) еловых лесов. Затем с ~ 4500 ^{14}C л.н. происходило осушение и промерзание болотного массива, развитие современных растительных сообществ.

Ключевые слова: Большеземельская тундра, позднеледниковье, голоцен, пыльцевые и непыльцевые палиноморфы, диатомеи

Для цитирования: Голубева Ю.В., Марченко-Вагапова Т.И. Условия озерного осадконакопления в низовье р. Сейды (север Республики Коми, Россия) по данным палинологического и диатомового анализов // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 368-373. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-368](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-368)

1. Введение

Интерес к палеогеографическим исследованиям в пределах Большеземельской тундры определяется весьма широким распространением приледниковых палеобассейнов. Так, крупные озера, образовавшиеся при отступании валдайских ледников и продолжавшие существовать в голоцене, были приурочены к Колвинской, Косью-Роговской и Лемвинской депрессиям. В среднем течении р. Усы в озерных котловинах отлагались ленточные глины (Квасов, 1975). Данные палинологического и диатомового анализов подобных объектов позволяют воссоздавать процессы осадконакопления при переходе от позднего неоплейстоцена к голоцену

и в голоцене. Опубликованы результаты анализов образований приледниковых озер на Кольском полуострове (Толстоброва и др., 2023), Карелии (Шелехова, 1995) и в бассейне Северной Двины (Zaretskaya et al., 2023). На особенности распределения в осадках водорослей педиаструм обращают внимание Л.В. Филимонова (2014) при реконструкциях развития болот в Карелии и В. Янковска (2008) на Урале.

В.А. Исаковым с помощью цифровой модели рельефа ArcticDem реконструирована конфигурация приледникового бассейна в долине Сейды, образованного при деградации валдайского оледенения. Согласно ей, в изученном нами обнажении вскрыта краевая часть палеоводоёма (Исаков, 2023).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ygolubeva@geo.komisc.ru (Ю.В. Голубева)

Поступила: 12 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Исследования проводились в береговом обнажении СД-5 (67°18'03,83"с.ш., 62°53'05,66"в.д.) в низовье р. Сейды (Воркутинский район Республики Коми). Диатомовый и палинологический анализы выполнены с шагом опробования 10 см из ленточной глины и 5 см – из торфа. При микроскопировании пыльцевых препаратов также идентифицировались водоросли *Pediastrum*, *Desmidiaceae* и другие непыльцевые палиноморфы. Проведено радиоуглеродное датирование шести образцов в ИГ РАН (г. Москва) и НГУ (г. Новосибирск).

3. Результаты и их обсуждение

В основании разреза залегает 9-метровая толща, сложенная мерзлой серой с сизым оттенком ленточной глиной с прослоями толщиной 1-4 мм. Она наблюдается от уреза воды, но доступной для опробования оказалась ее верхняя часть. Выше по разрезу расположена пачка песков мощностью 4 м, перекрываемая торфом мощностью 3 м. Микропалеонтологические остатки определены в 20 образцах из ленточной глины и 24 образцах торфа. В разделяющей их песчаной толще они обнаружены не были. По составу пыльцевых спектров и комплексов диатомовых водорослей в совокупности с особенностями литологического строения осадков выделены четыре этапа осадконакопления.

3.1. Осадконакопление в условиях приледникового озера

Ленточная глина: 1100-940 см. В спорово-пыльцевом комплексе преобладает пыльца карликовых берез (до 80 %), полыни (до 77 %) и маревых (до 33 %). Присутствие множества микрочастиц угля, обломков и единичных створок диатомей *Parallia sulcata*, других центральных водорослей, спикул, силикофлагеллят при большой доле дочетвертичной пыльцы (до 87 %) обусловлено их транспортировкой ледниковым покровом. Ранее подобные особенности состава палиноморф из ленточных глин, указывающие на суровые климатические условия, были выявлены М.П. Гричук и В.П. Гричуком (1960), Т.И. Смирновой (1966), Л.Б. Лавровой и др. (2011) и др.

Выше по разрезу (940-910 см) в осадках появляется алевритовая составляющая, а среди микропалеонтологических остатков встречены лишь единичные экземпляры спор, пыльцы и раковинных амеб пресноводных видов *Diffugia schurmanii* и *Cucurbitella dentata*.

Пачка переслаивания серых и темно-серых мелкозернистых песков (910-300 см), вероятно, накопилась при резком снижении уровня приледникового водоема и относится к прибрежной озерной фации. Спуск приледниковых бассейнов в бассейне Печоры происходил в результате отступления валдайских ледников. По мнению Д.Д. Квасова (1975), крупные озера Большеземельской тундры, за исклю-

чением Нижне-Печорского озера, получили сток на юг и юго-восток, так как на севере преградой этому был ледник.

3.2. Изолированное озеро, возникшее на месте приледникового озера

Начало образования торфа датировано 12125 ± 49 ^{14}C л.н. (AMS, GV 04522). В его нижней части (300-205 см) увеличивается содержание и разнообразие пыльцы. При этом в большинстве образцов, отнесенных к этому этапу седиментации, по-прежнему доминирует пыльца карликовой березы (до 53 %), полыни (до 29 %) и маревых (до 12 %). Лишь в двух спектрах (210-205 см), отражающих завершающую стадию существования озера (8719 ± 44 ^{14}C л.н., AMS, GV 04523), увеличивается доля пыльцы древовидной березы (28-56 %) и резко сокращается доля пыльцы ксерофильных трав. Обращает на себя внимание появление среди непыльцевых палиноморф типичных для водоемов с прозрачной водой водорослей педиаструм. В их числе преобладают холодолюбивые *Pediastrum integrum*. Также встречены *P. boryanum* var. *boryanum* и *P. var. rugulosum*, предпочитающие более высокие летние температуры. Подобные комплексы водорослей педиаструм выявлены Л.В. Филимоновой в осадках приледникового палеоозера на территории заказника «Толвоярви» в Карелии (2014). Участие в составе альгофлоры десмидиевых водорослей *Cosmarium* и рост их доли выше по разрезу до 10 % свидетельствует о развитии в окрестностях озера заболоченных участков. Существенно увеличивается видовое разнообразие и численность пресноводных диатомей, преимущественно бентосных форм. Присутствие створок *Denticulatenuis* var. *crassula*, *Diatoma hiemale* var. *mesodon*, *Didymosphenia geminate*, *Eucocconeis flexella*, *P. lata* указывает на условия мелководного олиготрофного водоёма с холодной, прозрачной, насыщенной кислородом и бедной биогенными элементами водой.

3.3. Заболачивание озера

Заключительный этап седиментации выделен в торфяных осадках в интервале 205-0 см. Пыльцевые спектры отличаются сокращением участия пыльцы карликовой березы (5-25 %) за счет увеличения количества пыльцы деревьев: сначала – древовидной березы (8-45 %) и позднее – ели (3-14 %). Рост доли водных травянистых растений (*Typha latifolia*, *Potamogeton*, *Menyanthes trifoliata*) и десмидиевых водорослей (*Cosmarium* до 19 %, единичные *Euastrum* и *Staurastrum*) в интервале 205-175 см отражает зарастание озера. В пользу этого свидетельствует уменьшение количества и разнообразия диатомей, а также исчезновение водорослей педиаструм. В осадках кровли разреза (~5000 ^{14}C л.н. по наст. время, 65-0 см) среди палиноморф доминируют *Betula nana* (26 %), *Vacciniaceae* (16 %) и *Ericales* (27 %), альгофлора не обнаружена.

4. Заключение

Литологическое строение обнажения позволяет соотнести формирование вскрытых в его основании отложений, сложенных ленточной глиной, в условиях приледникового озера. Состав спорово-пыльцевого спектра указывает на перигляциальную обстановку с преобладанием полынно-маревых и ерниковых зарослей в растительном покрове. Вышезалегающая песчаная толща в интервале глубин 910-300 см аккумулировалась, вероятно, при сокращении площади, занимаемой приледниковым бассейном.

Во временном диапазоне $12125 \pm 49 - 8719 \pm 44$ ^{14}C л.н. седиментация происходила в озере, образованном на месте приледникового озера. Об этом свидетельствуют находки в образцах торфа водорослей *Pediastrum* и обилие пресноводных диатомей, типичных для водоемов с прозрачной водой. Присутствие в их числе *P. boryanum* var. *boryanum* и *P. duplex* var. *rugulosum* фиксирует прогрев озерной воды и повышение летних температур. Растительный покров прилегающей территории состоял из кустарниковых зарослей березы и ольховника и полынно-маревых ассоциаций.

В дальнейшем до ~ 4500 ^{14}C л.н. накопление осадков происходило в условиях мелководного пресноводного заболачивающегося водоема, на что указывает значительное сокращение видового разнообразия и количества экземпляров диатомей, исчезновение водорослей педиаструм, и, напротив, некоторое увеличение доли десмидиевых водорослей, предпочитающих окислительную обстановку. Улучшение климатических условий ~ 9000 ^{14}C л.н. способствовало распространению березовых и позднее (7705 ± 43 ^{14}C л.н.) еловых лесов. Затем с ~ 4500 ^{14}C л.н. происходило осушение болота и развитие современных растительных сообществ многолетне-мерзлого торфяного массива из зарослей бруснично-верескоцветных и карликовой березки, чему способствовало постепенное похолодание климата.

Благодарности

Исследования проводились с привлечением оборудования ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ. Проект № 23-27-00281.

Конфликт интересов

Авторы заверяют, что конфликт интересов отсутствует.

Список литературы

- Исаков В.А. 2023. Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM. Вестник геонаук 10 (346): 42-50.
- Квасов Д.Д. 1975. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Ленинград: Наука.
- Лаврова Н.Б., Колька В.В., Корсакова О.П. 2011. Некоторые особенности палиноспектров донных отложений малых озер северной части Прибеломорской низменности. Геология и полезные ископаемые Карелии 14: 197-202.
- Толстоброва А.Н., Толстобров Д.С., Корсакова О.П. 2023. Условия формирования озерных отложений в долине р. Воронья (Кольский полуостров) по данным диатомового анализа. Труды Ферсмановской научной сессии 20: 218-221.
- Филимонова Л.В. 2014. История растительности в позднеледниковье и голоцене на территории заказника «Толвоярви» (Карелия). Труды Карельского научного центра 2: 3-13.
- Шелехова Т.С. 1995. Диатомовая флора голоценовых отложений малых озер Северо-Запада Карелии. Экология и география диатомовых водорослей [материалы школы по диатомовым водорослям] 6: 73-74.
- Jankovska V., Andreev A.A., Panova N.K. 2008. Holocene environmental history on the eastern slope of the Polar Ural Mountains, Russia. Boreas 35(4): 650-661. DOI:[10.1111/j.1502-3885.2006.tb01171.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2006.tb01171.x)
- Zaretskaya N., Utkina A., Baranov D. et al. 2023. Limited extension of the MIS 2 proglacial lake in the Severnaya Dvina valley, south-eastern margin of the last Scandinavian Ice Sheet. Journal of Quaternary Science: 1-20. DOI:[10.1002/jqs.3570](https://doi.org/10.1002/jqs.3570)

A reflection of modern vegetation of the Zhizhgin Island (White Sea) in pollen spectra of lake sediments

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Levkova D.N.^{1*}, Sapelko T.V.², Leontiev P.A.¹, Kublitskiy Yu.A.¹, Repkina T.Yu.³

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Nab. Moyki, St. Petersburg, 191186, Russia

² Institute of Limnology RAS – SPC RAS, 9 Sevastianova str., Saint-Petersburg, 196105, Russia

³ Institute of Geography RAS, 29 Staromonetnyy lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The first data on the composition of pollen spectra of subrecent lake sediments were obtained from surface samples of Lake Vodonosnoye and Lake Chernyaevskoye sediments on Zhizhgin Island, which is located in the southern part of the White Sea. Currently, woody vegetation on the island grows in small areas and consists mainly of shrubby birch and willow and oppressed pine. The pollen spectra generally reflect the modern vegetation of the island. The pollen spectra include pollen of tree species and grasses, which occupy large areas of open meadows and wetlands. *Picea* and *Pinus* pollen found in significant quantities is partly introduced. *Abies* and *Tilia* pollen are also likely introduced. The results of pollen analysis of surface samples will be used for pollen analysis of sediment sequences of the investigated lakes, which will allow for correct interpretation of the data obtained and a more correct reconstruction of the island's vegetation in the past.

Keywords: White Sea, Zhizhgin, islands, palynology, subrecent spectra, vegetation, lake sediments

For citation: Levkova D.N., Sapelko T.V., Leontiev P.A., Kublitskiy Yu.A., Repkina T.Yu. A reflection of modern vegetation of the Zhizhgin Island (White Sea) in pollen spectra of lake sediments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 374-379. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-374

1. Introduction

There are approximately 3,000 islands in the White Sea, with the vast majority located within the Kandalaksha and Onega Bays. The botanical diversity of these islands has not been uniformly studied. Smaller islands exhibit distinct characteristics in the formation of their natural conditions, which are related to their position in the water body, distance from the mainland, and prevailing wind patterns. The flora of the islands located in the Throat of the White Sea (Kutenkov et al., 2018) and in the Dvina (Churakova et al., 2016), Kandalaksha (Kozhin, 2014) and Onega Bays (Kravchenko et al., 2015), which includes the Solovetsky Archipelago (Kiselyova et al., 2005), has been investigated. Subrecent pollen spectra of surface sediments have been obtained for islands located in the Porya Bay of Kandalaksha Bay (Kozhin et al., 2015) and the Solovetsky Islands (Sapelko and Subetto, 2014).

The analysis of pollen spectra from surface samples and their comparison with the modern plant cover is a crucial step for the accurate interpretation of past pollen data, which is a key aspect of paleogeographic

studies in the White Sea area.

2. Materials and methods

Zhizhgin Island (65.199656°N., 36.81787°E) is located at the entrance to the Dvina Bay, and 5 kilometers north-northwest from Ukht-Navolok Cape on the Letnij coast of the Onega Peninsula. The area of the island is ~3 km². The island lies within the forest-tundra biome, characterized by mainly grass and sedge coastal meadows, shrubs of birch and willow trees, occasional patches of pine and low-growing birch stands, and a lichen-moss-shrub cover on rocky surfaces. The island is located in the forest-tundra zone, with predominantly cereal and sedge-dominated seaside meadows, shrubs of birch and willow, occasional pine and birch stands of low stature, and a lichen-moss-shrub cover on rocky surfaces. Traces of human impact are evident in the form of derelict buildings and a small landfill site located 300 m from Lake Chernyaevskoye.

In July 2022, on Zhizhgin Island, geomorphological, biological, and paleolimnological research was conducted, including the collection of cores from

*Corresponding author.

E-mail address: velajrad@gmail.com (D.N. Levkova)

Received: June 04, 2024; **Accepted:** July 05, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the bottom sediments of lakes at different elevations (Repkina et al., 2022). Surface sampling was carried out by Voronkov's lot from lakes Vodonosnoye (14.1 m above sea level (a.s.l.) and Chernyaevskoye (3.9 m a.s.l.) using the Voronkov's lot. The results of the spore-pollen analysis of the recent samples will assist in correctly interpreting the findings of the analysis of the bottom sediment cores.

Lake Vodonosnoye (65.19743°N, 36.80988°E), located 300 m from the sea, is situated on a marine terrace with elevations ranging from 15 to 17 m a.s.l. The terrain is composed of boulders, large pebbles, and in some areas, swampy areas. The average depth of the water is up to 1.8 meters. Surface sampling was conducted at four points, ranging from depths of 1.8 to 0.6 meters. Sediments consist of sandy silt.

Lake Chernyaevskoye (65.19450°N; 36.79179°E) is located approximately 240 meters from the sea and 700 meters from Lake Vodonosnoye. The depth of the lake reaches up to 1 m. The lake is situated in the southwestern part of an island in a marshy lowland with the western side opening to the sea. Samples were collected at three locations at depths ranging from 0.7 to 0.9 m. The sediments consist of sandy silt with algae inclusions.

3. Results and discussion

Based on the results of the pollen analysis, pollen spectra of surface samples from two lakes were obtained (Fig. 1). The spectra are dominated by the pollen of tree species, particularly *Betula*, *Pinus* and *Picea*. *Betula nana* and *Alnus* pollen are continuously present, while *Corylus*, *Abies* and *Salix* pollen are less frequent. In one of the lake samples, a single *Tilia* pollen grain was observed. The composition of the herbs is varied, with pollen from Poaceae, Cyperaceae and Ericaceae being dominant. There is a high pollen content in ruderal grasses such as *Plantago*, *Rumex* and

Artemisia. Among the spores, the following are noted: *Bryales*, Polypodiaceae and *Sphagnum*. Single spore grains from *Lycopodium*, *Dicranum* and *Botryhium* have also been found. All samples contain coal fragments, fungal spores and faunal remains.

The pollen spectra of Lake Vodonosnoye and Lake Chernyaevskoye are similar in terms of the composition of tree species present. All samples contain predominantly *Betula* pollen. The composition of all lake samples is homogeneous, with approximately equal proportions of trees, grasses and other plant species. Notable is the absence of *Salix* pollen, which grows on the shores, and the presence of *Picea* and *Abies*, which were not found near the lake. The herbs reflect the diverse composition found on the coast. In samples obtained from Lake Chernyaevskoye, pollen spectra vary depending on the location of sampling. The wood composition is similar to that found in samples from Lake Vodonosnoye, but there is a notable presence of *Salix* pollen in one sample (CH3); and the complete absence of *Abies* pollen. *Picea*, pollen from which was detected in all the pollen spectra from Lake Vodonosnoye and Lake Chernyaevskoye, was not detected in the vicinity. The proportion of herbs pollen is significantly higher than in Lake Vodonosnoye, in two samples (CH1 and CH2) it predominates. The increase in the concentration of pollen from the *Rumex* species, a maritime species of which was found on the coast, is of particular interest. The spore content is lower compared to that of Lake Vodonosnoye, despite its location in a lowland area and the significant marshland near the eastern shore of the lake. No spores were detected in one of the samples (CH2). It should be noted that the analyzed subrecent spectra contain pollen and spore fragments of both native vegetation and introduced species from other islands or mainland areas, for example, pollen grains of *Picea*, *Abies*, and *Tilia*, which are not found to the island.

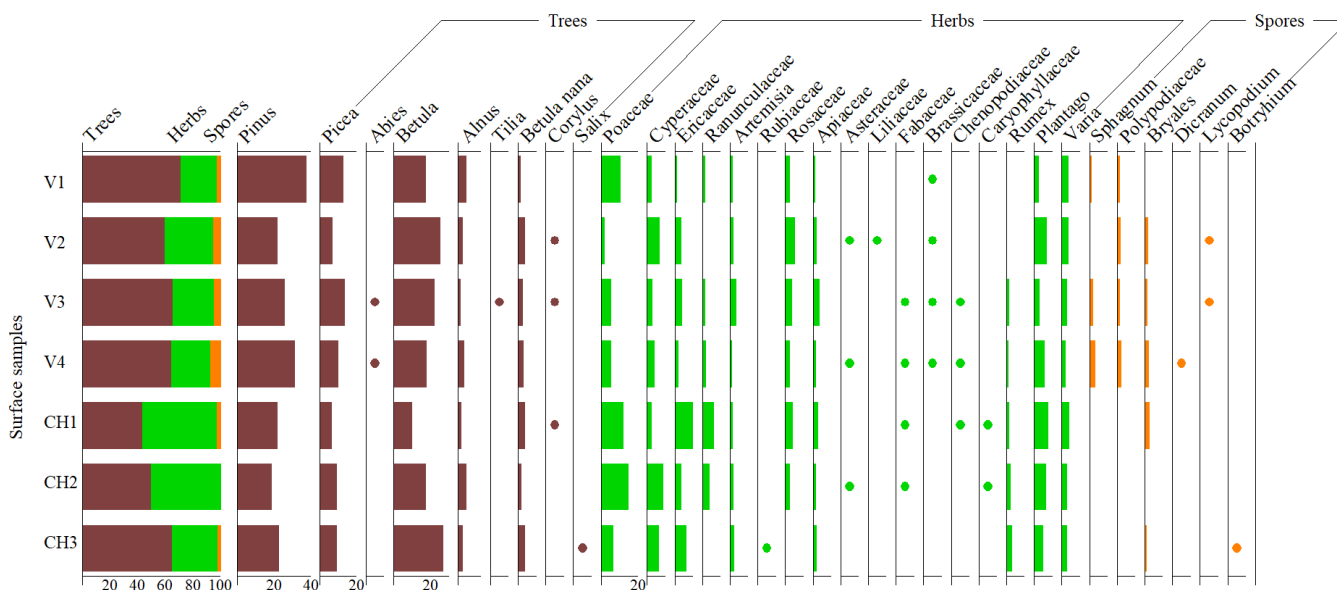


Fig.1. Pollen diagram of Vodonosnoye Lake (V1, V2, V3, V4) and Chernyaevskoye Lake (CH1, CH2, CH3)

4. Conclusions

The results of analyzing subrecent samples from two lakes generally correspond to the current vegetation of Zhizhgin Island. The pollen spectra include pollen from grasses that occupy large areas of open meadows and wetlands, as well as pollen from woody vegetation. At present, small forested areas are found on the island, composed primarily of shrubby birches, willows, and suppressed pine trees. It is likely that some of the pine and spruce pollen detected in significant quantities within the pollen spectra may be of non-local origin, which should be taken into consideration in future paleoreconstructions. The history of the development of vegetation on Zhizhgin Island will be reconstructed using pollen analysis of the bottom sediments sequences from the studied lakes, based on the results obtained.

Acknowledgements

The study was performed within the framework of the State Research Program of the Institute of Limnology, RAS – SPC RAS, No. FFZF-2024-0002 and the State Research Program of Herzen State Pedagogical University of Russia No. VRFY-2023-0010.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Churakova E.Yu., Sidorova O.V., Amosova I.B. et al. 2016. Island flora of the marine delta of the Northern Dvina River. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University] 2 (155): 86-97. (in Russian)

Kiselyova K.V., Novikov V.S., Oktyabryova N.B. et al. 2005. *Opredelitel' sosudistyh rastenij Solovetskogo arhipelaga* [Key to vascular plants of the Solovetsky Archipelago]. Moscow: KMK Scientific Press Ltd. (in Russian)

Kozhin M.N. 2014. Floristic diversity and ways of formation of island floras of the Kandalaksha Bay (using the example of the Porya Bay). Cand. Sc. Dissertation, Moscow State University, Moscow, Russia. (in Russian)

Kozhin M.N., Ershova E.G., Smyshlyaeva O.I. et al. 2015. Modern pollen spectra of the White Sea islands (case study of the Poriya Guba Bay). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia (Moscow University Bulletin. Series 5, Geography)* 3: 58-69. (in Russian)

Kravchenko A.V., Timofeeva V.V., Fadeeva M.A. 2015. Flora of the islands in the southern Onega Bay of the White Sea. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*. [Transactions of the Karelian Research Centre RAS] 4: 65-78. (in Russian) DOI [10.17076/bg17](https://doi.org/10.17076/bg17)

Kutenkov S.A., Kozhin M.N., Golovina E.O. et al. 2018. Polygonal patterned peatlands of the White Sea islands. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 138: 012010 DOI [10.1088/1755-1315/138/1/012010](https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012010)

Repkina T.Yu., Kublitskiy Yu.A., Leontiev P.A. et al. 2022. The natural environment of the coastal zone of the White Sea in Holocene: Zhizhgin Island. In: VI the All-Russian Scientific Conference «Dynamics of ecosystems in the Holocene», pp. 138. (in Russian)

Sapelko T.V., Subetto D.A. 2014. Palaeoecological data from Holocene lake sediments in the Solovki Islands, the White Sea. In: 9th European Paleobotany-Palynology Conference, pp. 242.

Отражение современной растительности о. Жижгин (Белое море) в палиноспектрах озёрных отложений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЛевкова Д.Н.^{1*}, Сапелко Т.В.², Леонтьев П.А.¹,
Кублицкий Ю.А.¹, Репкина Т.Ю.³¹ РГПУ им. А. И. Герцена, наб. реки Мойки, д. 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия² Институт озероведения РАН-СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, д. 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия³ Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. Получены первые данные о составе палиноспектров субрецентных озёрных отложений о. Жижгин, расположенном в южной части Белого моря, из поверхностных проб донных отложений озёр Водоносное и Черняевское. В настоящее время на острове произрастают небольшие древостои, состоящие в основном из кустарниковой берёзы и ивы и угнетенной сосны. Палиноспектры в целом отражают современную растительность острова. В палиноспектрах представлена пыльца древесных пород и трав, занимающих большие площади открытых луговых и заболоченных пространств. Обнаруженная в значительных количествах пыльца *Picea* и *Pinus* частично является занесённой. Пыльца *Abies* и *Tilia* также скорее всего является занесённой. Результаты спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб будут использованы для спорово-пыльцевого анализа колонок донных отложений изучаемых озёр, что позволит правильно интерпретировать полученные данные и более корректно реконструировать историю растительности острова в прошлом.

Ключевые слова: Белое море, Жижгин, острова, палинология, субрецентные спектры, растительность, озёрные отложения

Для цитирования: Левкова Д.Н., Сапелко Т.В., Леонтьев П.А., Кублицкий Ю.А., Репкина Т.Ю. Отражение современной растительности о. Жижгин (Белое море) в палиноспектрах озёрных отложений // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 374-379. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-374

1. Введение

В Белом море имеется около 3 тысяч островов, их подавляющее количество расположено в Кандалакшском и Онежском заливах. Ботанический состав островов изучен неравномерно. Для мелких островов характерны локальные особенности в формировании природных условий, связанные с расположением в акватории, удалённостью от материка, направлением ветров. Исследована флора островов в Горле Белого моря (Kutenkov et al., 2018), в заливах Двинском (Чуракова и др., 2016), Кандалакшском (Кожин, 2014) и Онежском (Кравченко и др., 2015), в том числе на Соловецком архипелаге (Киселёва и др., 2005). Субрецентные палиноспектры поверхностных проб получены для островов, расположенных в Порьей Губе Кандалакшского залива (Кожин и др., 2015), и для Соловецких островов (Sapelko and Subetto, 2014).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: velajrad@gmail.com (Д.Н. Левкова)

Поступила: 04 июня 2024; **Принята:** 05 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

Изучение спорово-пыльцевых спектров субрецентных (поверхностных) проб и сопоставление их с современным растительным покровом является важным этапом для правильной интерпретации спорово-пыльцевых спектров прошлого, что является одной из задач палеогеографических исследований в Беломорском регионе.

2. Материалы и методы

Остров Жижгин (65.199656 с.ш., 36.817874 в.д.) расположен у входа в Двинский залив в 5 км к северу – северо-западу от мыса Ухт-Наволоок Летнего берега Онежского полуострова. Площадь острова составляет ~3 км². Остров находится в лесотундровой зоне, где распространены в основном злаковые и осоковые приморские луга, заросли берёзы и ивы кустарниковой формы, редкие участки сосновых и берёзовых низкорослых древостоев и лишайни-

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ково-моховое и кустарничковое покрытие каменистых поверхностей. Следы антропогенного воздействия представлены в виде заброшенных зданий и небольшой свалки бытовых отходов в 300 метрах от оз. Черняевское.

На о. Жижгин в июле 2022 года проведены геоморфологические, биологические и палеолимнологические исследования, включающие отбор колонок донных отложений озёр, расположенных на разных высотных отметках (Репкина и др., 2022). Отбор поверхностных проб проводился лотом Воронкова из озёр Водоносное (14.1 м над уровнем моря (н.у.м.)) и Черняевское (3.9 м н.у.м.). Результаты спорово-пыльцевого анализа субрецентных проб помогут корректно интерпретировать результаты спорово-пыльцевого анализа колонок донных отложений.

Оз. Водоносное (65.19743°с.ш.; 36.80988°в.д.) находится в 300 м от моря на морской террасе с высотами 15-17 м н.у.м, сложенной валунами и крупной галькой, местами заболоченной, средняя глубина до 1.8 м. Отбор поверхностных проб проводился в четырёх точках на глубинах от 1.8 м до 0.6 м, осадки представлены опесчаненным илом.

Оз. Черняевское (65.19450°с.ш.; 36.79179°в.д.) находится в 240 м от моря и в 700 м от оз. Водоносное, глубины до 1 м. Расположено в юго-западной части острова в заболоченной низине, западной частью открывается к морю. Отбор проб производился в трёх точках на глубинах 0.7-0.9 м, осадки представляют опесчаненный ил с включениями водорослей.

3. Результаты и обсуждение

По результатам спорово-пыльцевого анализа получены палиноспектры поверхностных проб двух озёр (Рис.1). В спектрах преобладает пыльца древесных пород, преимущественно *Betula*, *Pinus* и *Picea*. Постоянно присутствует *Betula nana* и *Alnus*, реже *Corylus*, *Abies* и *Salix*. В одной из проб оз.

Водоносного отмечено одно пыльцевое зерно *Tilia*. Состав трав разнообразен. Доминирует пыльца Poaceae, Cyperaceae и Ericaceae. Высокое содержание пыльцы рудеральных трав — *Plantago*, *Rumex*, *Artemisia* и др. Среди споровых отмечены *Bryales*, *Polypodiaceae* и *Sphagnum*, встречаются единичные зёрна *Lycopodium*, *Dicranum* и *Botryhium*. Во всех образцах отмечаются частицы угля, грибы и остатки фауны.

4. Обсуждение

Спорово-пыльцевые спектры озёр Водоносное и Черняевское имеют сходство, выраженное в составе древесных пород. Во всех пробах преобладает пыльца *Betula*. Состав всех проб оз. Водоносного однороден; доля древесных, трав и споровых примерно одинаковы. Примечательно отсутствие пыльцы *Salix*, растущей на берегах, и присутствие хвойных пород *Picea* и *Abies*, которые не были обнаружены вблизи озера. В травах отображено разнообразие состава, которое представлено на побережье. В пробах оз. Черняевского палиноспектры меняются в зависимости от точки пробоотбора. Древесный состав схож с полученным в пробах оз. Водоносного, но отмечается присутствие пыльцы *Salix* в одной пробе (Ч3) и полное отсутствие пыльцы *Abies*. *Picea*, пыльца которой найдена в составе всех палиноспектров оз. Водоносного и оз. Черняевское, не была обнаружена вблизи. Доля пыльцы трав значительно больше, чем в оз. Водоносном, в двух пробах (Ч1 и Ч2) она преобладает. Примечательно увеличение содержания пыльцы *Rumex*, приморский вид которого был обнаружен на побережье. Отмечается малое по сравнению со спектрами оз. Водоносного содержание споровых, несмотря на расположение в низине и большую заболоченность территории у восточного берега. В одной из проб (Ч2) споры не обнаружены. Изученные субрецентные спектры состоят из пыльцы и спор как локальной раститель-

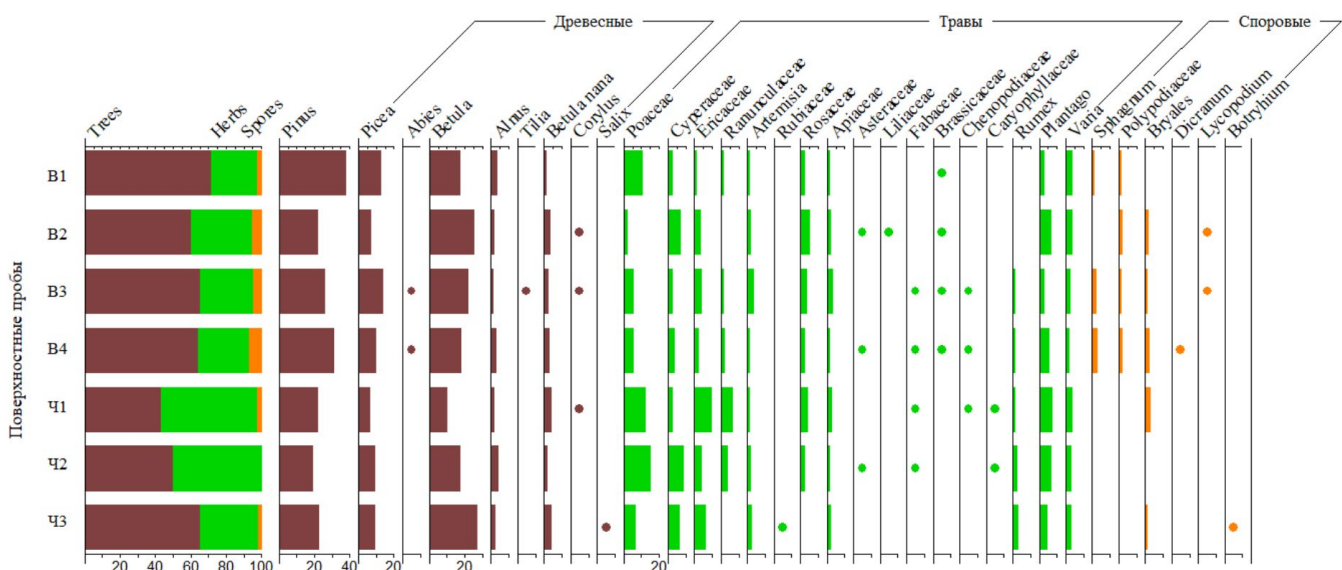


Рис.1. Растительный состав палиноспектров оз. Водоносное (B1, B2, B3, B4) и оз. Черняевское (Ч1, Ч2, Ч3)

ности, так и занесённой пыльцы с других островов или материковой зоны, например, пыльца *Picea*, *Abies* и *Tilia*, не встреченных на территории острова.

5. Выводы

Результаты изучения субрецентных проб двух озёр в целом отражают современную растительность о. Жижгин. Палиноспектры включают в себя пыльцу трав, занимающих большие площади открытых луговых и заболоченных пространств, и пыльцу древесной растительности. В настоящее время на острове произрастают небольшие древостои, состоящие в основном из кустарниковых берёзы и ивы и угнетенной сосны. Вероятно, обнаруженная в значительных количествах в пыльцевых спектрах пыльца сосны и ели частично является заносной, что необходимо учитывать при дальнейших палеорекострукциях. История развития растительности о. Жижгин будет восстановлена с помощью спорово-пыльцевого анализа донных отложений изучаемых озёр с использованием полученных результатов.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИНОЗ РАН-СПб ФИЦ РАН № FFZF-2024-0002 и РГПУ им. А. И. Герцена № VRFY-2023-0010.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

Киселёва К.В., Новиков В.С., Октябрёва Н.Б. и др. 2005. Определитель сосудистых растений Соловецкого архипелага. Москва: Товарищество научных изданий КМК.

Кожин М.Н. 2014. Флористическое разнообразие и пути формирования островных флор Кандалакшского залива (на примере Порьей губы). Автореф. дисс. канд. биол. наук. Москва, Россия.

Кожин М.Н., Ершова Е.Г., Смышляева О.М. и др. 2015. Современные спорово-пыльцевые спектры островов Белого моря (Порья губа). Вестник Московского университета. Серия 5, География 3: 58-69.

Кравченко А.В., Тимофеева В.В., Фадеева М.А. 2015. О флоре островов в южной части Онежской губы Белого моря (Республика Карелия). Труды Карельского научного центра РАН 4: 65-78. DOI [10.17076/bg17](https://doi.org/10.17076/bg17)

Репкина Т.Ю., Кублицкий Ю.А., Леонтьев П.А. и др. 2022. Условия развития береговой зоны Белого моря в голоцене: о. Жижгин. В: VI Всероссийская научная конференция «Динамика экосистем в голоцене», стр. 138.

Чуракова Е.Ю., Сидорова О.В., Амосова И.Б. и др. 2016. Флора островов приморской части дельты р. Северной Двины. Ученые записки Петрозаводского государственного университета 2 (155): 86-97.

Kutenkov S.A., Kozhin M.N., Golovina E.O. et al. 2018. Polygonal patterned peatlands of the White Sea islands. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 138: 012010 DOI [10.1088/1755-1315/138/1/012010](https://doi.org/10.1088/1755-1315/138/1/012010)

Sapelko T.V., Subetto D.A. 2014. Palaeoecological data from Holocene lake sediments in the Solovki Islands, the White Sea. In: 9th European Paleobotany-Palynology Conference, pp. 242.

On the issue of the formation of a “pink horizon” in varved clays of the Onega Ice Lake

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYGolyeva A.A.^{1*}, Mergelov N.S.¹, Subetto D.A.²¹Institute of Geography Russian Academy, Staromonetnij per., 27, Moscow, 119017, Russia²Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika emb. 48, 191186, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of a study of samples from the “pink horizon” in sediments of the Onega Ice Lake. A large amount of iron in this horizon is shown, their shapes and sizes are determined. The presence of microbial mats and biofilms in this layer was revealed, and a conclusion was made about the rate of accumulation of varved clays.

Keywords: iron, scanning electron microscope, raman spectra, microanalyzer, microbial mats, varved clays, Onega Ice Lake

For citation: Golyeva A.A., Mergelov N.S., Subetto D.A. On the issue of the formation of a “pink horizon” in varved clays of the Onega Ice Lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 380-383. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-380

1. Introduction

The structure and composition of the “pink horizon” in varved clays, which is a stratigraphically consistent marking horizon throughout the entire area of the Onega Ice Lake waters and dated to approximately 13,300–13,200 calibrated years ago (Hang et al., 2019), was analyzed. The origin and structure of this horizon remain a matter of debate.

2. Materials and Methods

The research was conducted on Lake Polevskoye, which is located on the Zaonezhsky Peninsula (Lake Onega) in the Republic of Karelia. From the sediment core N125, represented by varved clays of the Onega Ice Lake, 18 selected samples in 0.5 cm intervals, were analyzed (depth 9.64–9.84 m – “pink horizon”).

For microscopical analysis all samples were treated with 30% hydrogen peroxide (30% H₂O₂) at room temperature. This is included in the standard sample preparation to break down organo-mineral compounds and disperse the sample. An electron scanning electron microscope (SEM) JEOL 6610LV (JEOL, Japan) was used. The most characteristic and frequently encountered particles were photographed. To refine the chemical composition of individual particles, an INCAx-act (MAn) microanalyzer (Oxford Instruments, UK) was used.

*Corresponding author.

E-mail address: golyeva@igras.ru (A.A. Golyeva)

Received: June 12, 2024; Accepted: June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

Raman spectra were acquired directly from the Fe-containing particles and films on a Renishaw inVia Reflex microspectrometer (UK) equipped with 532 nm and 785 nm lasers using a 50x objective with 0.5 numerical aperture. The laser power was set to below 0.5 mW to avoid alteration of the sample due to heating. The acquisition time was between 10 to 180 sec per single measurement. For black C-rich particles, we used 532 nm laser set to 5–10 mW power and 10 sec of acquisition time.

3. Results and Discussion

All samples initially had a dark gray color, which is characteristic of lake sediment. The pink color in the central part of the sample was not clearly visible. After treatment with hydrogen peroxide, the major (central) portion of the samples turned bright red, while the peripheral portions remained unchanged.

Scanning electron microscopy did not reveal any organic-mineral particles, such as algae cysts, diatom shells, or sponge spicules, which are typically found in lake sediments. Instead, only microbial mats and films were observed. The main part of all samples is represented by mineral particles of various sizes.

A large number of small (2–3 microns) iron oxide crystals were found in the samples of the central part of the column.

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



The use of a microanalyzer revealed that iron is present in these samples, not only in the form of individual minerals, but also as thin ferruginous coatings on all particles (fragments of aluminosilicates and microbial mats). The iron content on the particle surface is heterogeneous, varying from 1 to 80 weight percent relative to other chemical elements, with an average 25-30 weight percent.

Raman spectroscopy of the lake sediment indicated the presence of Fe oxides particles among the matrix of silicate minerals and indicated transformations in their chemical structure towards Fe-(oxy) hydroxides. Among oxides, we identified abundant hematite (Fe₂O₃) grains and among (oxy)hydroxides – goethite (α-FeO(OH)), which was rare and always occurred in combination with hematite. The following Raman bands characteristic of hematite (Hanesch, 2009) were present in the spectra: at 222-225 (with a shoulder at 245), 290–300 and 407-408 cm⁻¹. The additional bands at 298-299 and 379-385 cm⁻¹, when present, likely indicate partial hematite transformation with appearance of bands characteristic of goethite and other Fe-(oxy)hydroxides. Hematite spectra were often mixed with a sharp peak at 464-465 cm⁻¹ originating from quartz.

Sediments also contained numerous carbon-rich black particles, mainly in the form of flakes. These particles demonstrated sharp first-order D (structural defects in aromatic C) and G (in-plane vibration of C=C bonds) peaks centered at around 1350 cm⁻¹ and at 1580 cm⁻¹ respectively, and the second-order band centered at ~2700 cm⁻¹. Overall, Raman spectra suggested contribution from graphitic and other types of thermally mature carbons likely of geological origin (e.g., C of metamorphic rocks).

4. Conclusion

The change in the color of the samples after treatment with hydrogen peroxide is associated with the presence of significant amounts of iron in them. This is independently confirmed by the data obtained using the microanalyzer. Forms of iron compounds take the form of small crystals and amorphous films covering the surfaces of other particles within the samples. Those samples that did not alter color following perox-

ide treatment were devoid of any iron forms (crystals or film).

The presence of biogenic structures within the samples exclusively in the form of microbial mats and biofilms suggests relatively rapid sedimentation accumulation processes that inhibited the emergence of more complex organic structures, such as framboids, diatoms, etc.

Microbial mats and biofilms may develop in deep water even at a depth of 100 m and below (Andersen et al., 2011; Greco et al., 2020). In deep-water environments the composition of the microbial community may shift from photoautotrophs to chemoautotrophs. Microorganisms with diverse metabolic strategies have been reported from bottom sediments of Lake Baikal including its deep-water parts (Zemskaya et al., 2021).

Acknowledgements

The study was supported by the Russian Scientific Foundation (#24-17-00206).

Conflict of Interest

The author(s) declare no potential conflict of interest.

References

- Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. 2019. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quaternary International*, 524, 13-23. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021)
- Hanesch M. 2009. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy) hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International* 177(3): 941-948.
- Andersen D.T., Sumner D.Y., Hawes I. et al. 2011. Discovery of large conical stromatolites in Lake Untersee, Antarctica. *Geobiology* 9(3): 280-293.
- Greco C., Andersen D.T., Hawes I. et al. 2020. Microbial diversity of pinnacle and conical microbial mats in the perennially ice-covered lake Untersee, East Antarctica. *Frontiers in Microbiology* 11: 607251.
- Zemskaya T.I., Bukin S.V., Lomakina A.V. et al. 2021. Microorganisms in the sediments of Lake Baikal, the deepest and oldest lake in the world. *Microbiology* 90(3): 298-313.

К вопросу о формировании «розового» горизонта в ленточных глинах Онежского приледникового озера



Гольева А.А.^{1*}, Мергелов Н.С.¹, Субетто Д.А.²

¹Институт географии РАН, 119017, Старомонетный пер., 27, Москва, Россия

²РГПУ им. А.И. Герцена, наб. Мойки 48, 191186, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приводятся результаты исследования образцов из «розового горизонта» в отложениях Онежского приледникового озера. Показано большое количество железа в этом горизонте, определены их формы и размеры. Выявлено присутствие в этом слое микробных матов и биопленок, сделан вывод о скоростях накопления ленточных глин.

Ключевые слова: железо, электронный сканирующий микроскоп, рамановский спектр, микроанализатор, микробные маты, ленточные глины, Онежское приледниковое озеро

Для цитирования: Гольева А.А., Мергелов Н.С., Субетто Д.А. К вопросу о формировании «розового» горизонта в ленточных глинах Онежского приледникового озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 380-383. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-380

1. Введение

Проанализированы строение и состав «розового горизонта» в ленточных глинах. Он представляет собой стратиграфически выдержанный маркирующий слой на всей площади отложений вод Онежского приледникового озера и датируется примерно 13 300–13 200 кал. Лет назад (Hang et al., 2019). Происхождение и структура этого горизонта остаются предметом дискуссий.

2. Материалы и методы

Исследования проводились на Полевском озере, расположенном на Заонежском полуострове (Онежское озеро) в Республике Карелия. Из керна N125, представленного ленточными глинами Онежского приледникового озера, было изучено 18 проб, отобранных с интервалом 0,5 см (глубина 9,64–9,84 м – «розовый горизонт»).

Для микроскопического анализа все образцы обрабатывали 30% перекисью водорода (30% H₂O₂) при комнатной температуре. Это входит в стандартную пробоподготовку для удаления органико-минеральных соединений и диспергирования пробы. Использовали электронный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JEOL 6610LV (JEOL, Япония). Наиболее характерные и часто встречающиеся частицы были сфотографированы. Для

уточнения химического состава отдельных частиц использовали микроанализатор INCAx-act (MAx) (Oxford Instruments, Великобритания).

Спектры комбинационного рассеяния (рамановские спектры) были получены непосредственно от Fe-содержащих частиц и пленок на микроспектрометре Renishaw inVia Reflex (Великобритания), оснащенный лазерами с длиной волны 532 нм и 785 нм, с использованием объектива 50x с числовой апертурой 0,5. Мощность лазера была установлена ниже 0,5 мВт, чтобы избежать изменения образца из-за нагрева. Время сбора данных составляло от 10 до 180 секунд на одно измерение. Для черных частиц с высоким содержанием углерода мы использовали лазер с длиной волны 532 нм, мощность 5–10 мВт и время сбора данных 10 с.

3. Результаты и обсуждение

Все образцы исходно имели преимущественно темно-серую окраску, характерную для озерных отложений. Розовый оттенок центральной части изучаемой колонки был выражен слабо. После обработки перекисью водорода основная (центральная) часть образцов приобрела интенсивный красный цвет в то время как цветность периферийных образцов не изменилась.

Просмотр образцов под электронным микроскопом не выявил каких-либо органико-минеральных

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: golyeva@igras.ru (А.А. Гольева)

Поступила: 12 июня 2024; **Принята:** 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024



частиц, типичных для озерных осадков (цист водорослей, панцирей диатомовых водорослей, фрамбоидов, спикул губок). Единственными частицами биогенной природы являлись микробные маты и пленки. Основная часть всех образцов представлена минеральными частицами разной размерности.

В образцах центральной части колонки встречено большое количество мелких (2-3 микрона) кристаллов оксида железа.

Использование микроанализатора показало, что в этих образцах железо присутствует не только как отдельные минералы, но и в виде тонких железистых пленок, покрывающих все частицы (обломки алюмосиликатов и микробные маты). Содержание железа на поверхности частиц неоднородно – варьирует от 1 до 80 весовых процентов относительно других химических элементов, составляя в среднем 25-30 весовых %.

Рамановская спектроскопия озерных отложений показала наличие частиц оксидов железа среди матрицы силикатных минералов и указала на трансформацию их химической структуры в сторону Fe-(окси)гидроксидов. Среди оксидов выявлено большое количество зерен гематита (Fe_2O_3), а среди (окси)гидроксидов – гетита ($\alpha\text{-FeO(OH)}$), который встречается редко и всегда в сочетании с гематитом. В спектрах присутствовали следующие рамановские полосы, характерные для гематита (Hanesch, 2009): 222–225 (с плечом 245), 290–300 и 407–408 см^{-1} . Дополнительные полосы при 298-299 и 379-385 см^{-1} , если они присутствуют, вероятно, указывают на частичную трансформацию гематита с появлением полос, характерных для гетита и других Fe-(окси)гидроксидов. Спектры гематита часто смешаны с резким пиком 464-465 см^{-1} , принадлежащим кварцу.

Отложения также содержали многочисленные богатые углеродом черные частицы, преимущественно в виде хлопьев. Эти частицы демонстрировали резкие пики D первого порядка (структурные дефекты в ароматическом C) и G (плоские колебания связей C=C) с центрами около 1350 см^{-1} и 1580 см^{-1} соответственно, а также полосу второго порядка, с центром ~2700 см^{-1} . В целом, рамановские спектры свидетельствуют о вкладе графита и других типов термически зрелого углерода, вероятно, геологического происхождения (например, углерода метаморфических пород).

4. Заключение

Изменение окраски образцов после обработки их перекисью водорода связано с наличием в них значительных объемов железа. Это независимо

подтверждается данными, полученными с помощью микроанализатора. Формы соединений железа представлены мелкими кристаллами и аморфными пленками на поверхностях других частиц. Образцы, не изменившие окраску после обработки перекисью каких-либо форм железа (кристаллы, пленка) не имели.

Присутствие в образцах биогенных форм исключительно в виде микробных матов и биопленок указывает на относительно быстрые процессы накопления осадков, не позволившие появиться более сложным органическим формам, например, фрамбоидам, диатомовым водорослям и пр.

Микробные маты и биопленки могут развиваться в глубокой воде даже на глубине 100 м и ниже (Andersen et al., 2011; Greco et al., 2020). В глубоководных средах состав микробного сообщества может меняться от фотоавтотрофов к хемоавтотрофам. Например, в отложениях озера Байкал, включая его глубоководные части, обнаружены микроорганизмы с разнообразными метаболическими стратегиями (Zemskaya et al., 2021).

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Конфликт интересов

Авторы не сообщают о потенциальном конфликте интересов.

Список литературы

- Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. 2019. A local clay-varve chronology of Onega Ice Lake, NW Russia. *Quaternary International*, 524, 13-23. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021)
- Hanesch M. 2009. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy) hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International* 177(3): 941-948.
- Andersen D.T., Sumner D.Y., Hawes I. et al. 2011. Discovery of large conical stromatolites in Lake Untersee, Antarctica. *Geobiology* 9(3): 280-293.
- Greco C., Andersen D.T., Hawes I. et al. 2020. Microbial diversity of pinnacle and conical microbial mats in the perennially ice-covered lake Untersee, East Antarctica. *Frontiers in Microbiology* 11: 607251.
- Zemskaya T.I., Bukin S.V., Lomakina A.V. et al. 2021. Microorganisms in the sediments of Lake Baikal, the deepest and oldest lake in the world. *Microbiology* 90(3): 298-313.

Evolution of Lake Ladoga as recorded in litho- and biostratigraphy of a small coastal lake

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYLudikova A.V.^{1*}, Kuznetsov D.D.¹, Subetto D.A.², Belkina N.A.³¹Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – SPC RAS, Sevastyanova str. 9, St. Petersburg, 196105, Russia²Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika River emb. 48, St. Petersburg, 191186, Russia³Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Alexander Nevsky pr. 50, Petrozavodsk, 185910, Russia

ABSTRACT. The study is focused on the litho- and biostratigraphic record of Lake Lavijarvi, presently a small lake in the closest vicinity from the Ladoga coast, and formerly a sheltered bay of Lake Ladoga. Several stages of its evolution were revealed that are characterized with different organic matter content in the sediments, diatom assemblages composition and abundances of siliceous microalgae remains. It has been demonstrated that at the earlier stages, the environments in the basin of Lake Lavijarvi were similar to those in Lake Ladoga. Later in the Holocene, local factors became more pronounced, and the conditions different from those in the open-water part of Lake Ladoga established in the basin of Lake Lavijarvi. The regression of Lake Ladoga resulted in the isolation of Lake Lavijarvi and the beginning of its small-lake stage after ca. 3900 cal. BP.

Keywords: lake sediments, diatoms, chrysophyte cysts, organic matter content, Holocene, lake-level changes, Baltic Ice Lake

For citation: Ludikova A.V., Kuznetsov D.D., Subetto D.A., Belkina N.A. Evolution of Lake Ladoga as recorded in litho- and biostratigraphy of a small coastal lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 384-389. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-384

1. Introduction

Despite of more than 60 years of paleolimnological research in Lake Ladoga, a number of questions concerning the evolution of this largest European lake still arouse interest in the scientific community. Those include the lake-level changes and paleo-shoreline displacement in the late- and postglacial times, as well as the lake ecosystem responses to climate and environmental changes and human impact.

Application of the modified isolation-basins approach that involves the small lakes inundated by Lake Ladoga waters during its high-level stages in the past provides a valuable information on the environmental conditions in these paleo-bays of Lake Ladoga. The present study is aimed at reconstructing late- and postglacial environments in a former northern sheltered bay of Lake Ladoga based on the litho- and biostratigraphy of the sediments of a low-lying isolation basin in the close vicinity to the present Ladoga coast.

2. Materials and methods

Lake Lavijarvi (61°38.267' N, 30°29.407' E) is a relatively small ($S=2.2 \text{ km}^2$) and rather deep (up to 26 m) lake located in the northern coastal area of Lake Ladoga (Fig.). The shortest distance from Lake Lavijarvi to the present Lake Ladoga coast is < 5 km. The lake's elevation is 5.9 m a.s.l. that is only 0.9 m above the present average level of Lake Ladoga. It drains via a small stream to Lake Polyakovo (5.2 m a.s.l.) and finally to the Otsoistenlahti Bay of Lake Ladoga. Due to its low elevation and a short distance to the coast the basin of Lake Lavijarvi must have been inundated by the Ladoga waters during the high-level stages of Lake Ladoga in the late- and postglacial times.

Ca. 3.9-m long sediment core was retrieved at 5.5 m depth using the Russian peat corer. Loss-on-ignition (LOI) and diatom analyzes and radiocarbon AMS dating of the sediments were performed. Chrysophyte (golden algae) cysts were counted alongside with the diatom valves, and concentrations of each group of the sili-

*Corresponding author.

E-mail address: ellerbeckia@yandex.ru (A.V. Ludikova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



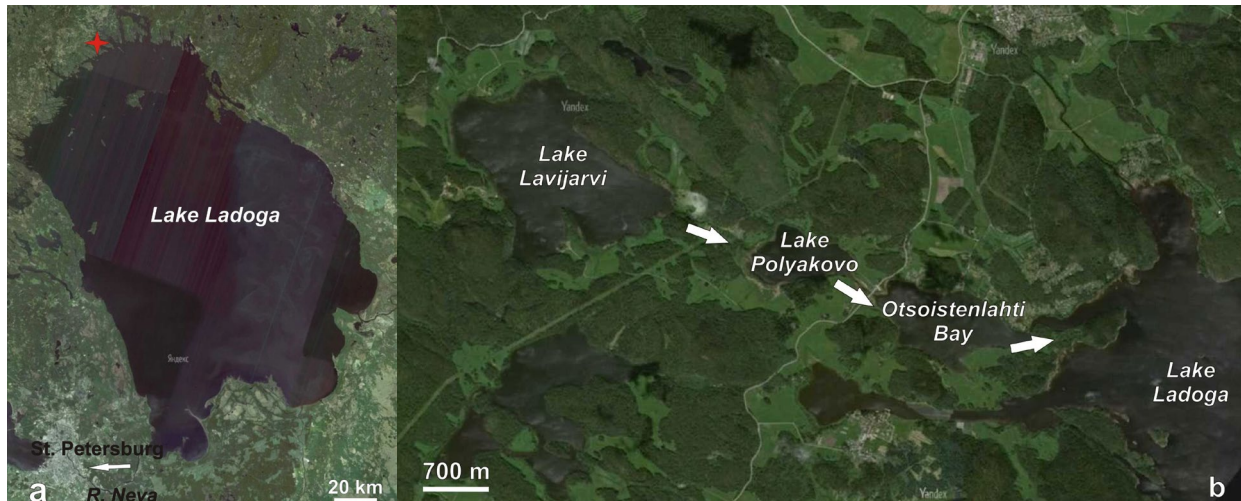


Fig. (a) – Lake Ladoga and Lake Lavijarvi (red star); (b) – a closer view of the location of Lake Lavijarvi.

ceous microfossils and “cysts to diatoms” ratios were subsequently calculated.

3. Results and discussion

The lowermost sediment unit is represented by varved clays accumulated at the bottom of Lake Ladoga and adjacent lowlands in the Late Glacial when the large areas were occupied by the proglacial lake, the Baltic Ice Lake. Low LOI values (<2%) recorded in this unit are characteristic for the glaciolacustrine clays in the Ladoga basin (Subetto, 2002; Kuznetsov and Subetto, 2021). Low concentrations of the diatom valves and chrysophyte cysts observed in these clays in Lake Lavijarvi indicate low-productive environments of the BIL. Similarly low abundances of the siliceous microfossils were recorded in lateglacial sediments everywhere in Lake Ladoga (The History..., 1990; Ludikova, 2023).

The sharp transition to gyttja clay corresponds to the catastrophic drainage of the BIL ca. 10600 cal. BP. This resulted in a minor increase in LOI values and a pronounced rise of diatom and chrysophyte concentrations indicating the onset of the “Lake Ladoga bay” stage of the evolution of Lake Lavijarvi. At the onset of this stage, relatively high proportions of the diatom species indicative for the freshwater *Ancylus* Lake transgression in the Baltic Sea were observed in the diatom record. The waters of the *Ancylus* Lake are believed to have entered to the Ladoga basin. Most of the indicative *Ancylus* taxa, however, are also common for the post-*Ancylus* diatom assemblages of Lake Ladoga. It is not clear therefore whether their higher abundances in the Early-Holocene sediments result from the direct influence of the *Ancylus* Lake. Previous paleolimnological studies suggested that the *Ancylus* transgression in the northern part of the Ladoga basin was obscured by the ongoing isostatic uplift as reflected in the high percentages of benthic diatoms (Davydova and Subetto, 2000). High proportions of benthic taxa and a minor increase in planktonic *Aulacoseira subarctica* also observed in the diatom record of Lake Lavijarvi as well as elsewhere in the Early-Holocene sediments

in Lake Ladoga (Kostrova et al., 2019; Ludikova and Kuznetsov, 2021).

Further increase in organic matter content and accumulation of clay gyttja suggest increasing productivity of the Lake Ladoga ecosystem as the climate gradually warmed. Planktonic species tend to dominate in the diatom assemblages (>70%) where the most abundant species was *Aulacoseira islandica*, a taxon typical of the Holocene Ladoga phytoplankton. It is arguable, however, whether the predominance of planktonic diatoms may result from some slowing-down of the isostatic uplift rate of the northern Ladoga basin outrun by the lake-level rise. The “cysts to diatoms” ratios also increases in the Lake Lavijarvi sediments during this period unlike the sediment records from the central Lake Ladoga where their highest values were more characteristic for the onset of the Holocene (Ludikova, 2023). It can be suggested that more favorable environments for chrysophytes existed in the sheltered bays of Lake Ladoga compared to its open-water part.

The Holocene climatic optimum is clearly recorded in the highest LOI values (9%) and increased diatom and chrysophyte concentrations ca. 7700 cal. BP. Although planktonic *A. islandica* remained abundant, the predominance of benthic taxa re-established by that time pointing to extensive shallow-water areas in the paleo-bay of Lake Ladoga.

Further increase in diatom concentrations is typical of the second half of the Holocene in Lake Ladoga (The History..., 1990). However, synchronously increasing abundances of chrysophytes were not recorded in other sediment cores in Lake Ladoga, and probably reflect specific environments of the sheltered bay.

The transition to the next stage of the evolution of Lake Lavijarvi is record as a dramatic decline in the organic matter content and shifts in the diatom assemblages composition. According to the radiocarbon dating, these changes occurred after ca. 3900 cal. BP and can be therefore attributed to the Ladoga level drop due to the formation of its new outlet, the River Neva, ca. 3400 cal. BP. As a result of the regression, the Lake Ladoga level lowered down to the present 5 m a.s.l., the coastal lowlands emerged and a number of small lakes isolated from Lake Ladoga.

4. Conclusions

The litho- and biostratigraphic study of the sediments of Lake Lavijarvi, a former bay of Lake Ladoga, has demonstrated that at the earlier stages similar environments existed in both basins. Later in the Holocene, however, the sheltered bay provided the specific conditions different from those in the open-water part of Lake Ladoga as reflected in the dynamics of organic matter content, diatom assemblages composition, absolute and relative abundances of chrysophyte cysts.

Acknowledgements

The study contributes to the State Research Program of the Institute of Limnology – SPC RAS (FFZF-2024-0001) and is supported by the RSF (24-17-00206).

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Davydova N.N., Subetto D.A. 2000. Geoecological monitoring of Lake Ladoga based on paleolimnological data. In: Lake Ladoga. Petrozavodsk, pp. 66-75. (In Russian)
- Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L. et al. 2019. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes. *Boreas* 48: 361-376. DOI:[10.1111/bor.12385](https://doi.org/10.1111/bor.12385)
- Kuznetsov D.D., Subetto D.A. 2021. Holocene organic sedimentation in Lake Ladoga. *Geomorfologiya* 52(2): 63-71. DOI:[10.31857/S043542812102005X](https://doi.org/10.31857/S043542812102005X) (in Russian)
- Ludikova A.V., Kuznetsov D.D. 2021. Siliceous microalgae in the Lake Ladoga sediments and their significance in paleolimnological reconstructions. *Izvestia RGO [Proceedings of Russian Geographical Society]* 153(6): 46-64. DOI:[10.31857/S0869607121060033](https://doi.org/10.31857/S0869607121060033) (in Russian)
- Ludikova A.V. 2023. The use of Chrysophyceae cysts in studies of the evolution of Lake Ladoga ecosystem in the Holocene. In: *Micropaleontology: fundamental problems and contribution to regional geological studies. Proceedings of the XVIII Russian micropaleontological meeting*, pp. 373-376. (in Russian)
- Subetto D.A. 2002. Structure, specifics and history of formation of the bottom sediments. In: *Lake Ladoga: past, present and future*. SPb, pp. 122-136.
- The History of Lakes Ladoga, Onega, Pskov-Chudskoye, Baikal and Khanka. 1990. Leningrad: Nauka Publ. (in Russian)

Эволюция Ладожского озера в лито- и биостратиграфии небольшого прибрежного озера

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЛудикова А.В.^{1*}, Кузнецов Д.Д.¹, Субетто Д.А.², Белкина Н.А.³¹Институт озероведения Российской академии наук – СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия²Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия³Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, 185030, Россия

АННОТАЦИЯ. Работа направлена на лито- и биостратиграфическое изучение отложений озера Лавиярви, которое в настоящее время представляет собой небольшой водоем в непосредственной близости от Ладожского побережья, а в прошлом являлось закрытым заливом Ладожского озера. Было выявлено несколько этапов его эволюции, которые характеризуются различным содержанием органического вещества в донных отложениях, составом диатомовых комплексов и содержанием остатков кремнистых микроводорослей. Было показано, что на более ранних стадиях условия в котловине озера Лавиярви были сходны с обстановками в Ладожском озере. В дальнейшем локальные факторы стали более выраженными и в озере Лавиярви установились условия, отличные от таковых в открытой части Ладожского озера. Падение уровня Ладожского озера привело к отделению озера Лавиярви и переходу к стадии малого водоема после 3900 кал. л.н.

Ключевые слова: донные отложения, диатомовые водоросли, цисты хризофитов, содержание органического вещества, голоцен, изменения уровня озера, Балтийское ледниковое озеро

Для цитирования: Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А., Белкина Н.А. Эволюция Ладожского озера в лито- и биостратиграфии небольшого прибрежного озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 384-389. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-384

1. Введение

Несмотря на более чем 60-летние палеолимнологические исследования Ладожского озера, ряд вопросов, касающихся эволюции этого крупнейшего озера Европы, по-прежнему вызывают интерес в научном сообществе. К ним относятся изменения его уровня и перемещение береговой линии в поздне- и послеледниковое время, а также реакция озерной экосистемы на изменения климата и окружающей среды и антропогенное воздействие.

Применение модифицированного метода изоляционных бассейнов, который подразумевает изучение малых озер, затопивавшихся водами Ладоги на этапах ее высокого уровня в прошлом, дает ценную информацию об условиях среды в этих ладожских палеозаливах. Целью настоящего исследования является реконструкция природных обстановок поздне- и послеледниковья в бывшем

закрытом заливе северной части Ладожского озера на основе лито- и биостратиграфии донных отложений изоляционного бассейна, расположенного на низких отметках в непосредственной близости от современного побережья Ладоги.

2. Материалы и методы

Озеро Лавиярви (61°38.267' с.ш., 30°29.407' в.д.) – относительно небольшое ($S=2.2$ км²) и довольно глубокое (до 26 м) озеро, расположенное в северной прибрежной зоне Ладожского озера (Рис.). Кратчайшее расстояние от озера Лавиярви до нынешнего побережья Ладоги составляет менее 5 км. Высота озера 5,9 м над у.м., что всего на 0,9 м выше современного среднего уровня Ладожского озера. Озеро Лавиярви соединяется небольшим водотоком с озером Поляково (5,2 м над у.м.),

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ellerbeckia@yandex.ru (А.В. Лудикова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.





Рис. (а) – Ладожское озеро и озеро Лавиярви (красная звездочка); (б) – более подробный обзор местоположения озера Лавиярви.

которое, в свою очередь, дренируется в залив Отсойстенлахти Ладожского озера. Расположенный на небольшой абсолютной отметке и близком расстоянии от побережья Ладожского озера, бассейн озера Лавиярви должен был затапливаться ладожскими водами во время трансгрессивных стадий Ладого в поздне- и послеледниковое время.

Колонка донных отложений мощностью ок. 3.9 м была отобрана с глубины 5.5 м с помощью русского торфяного бура. Были выполнены анализ потерь при прокаливании (ППП), диатомовый анализ и радиоуглеродное датирование отложений методом ускорительной масс-спектрометрии. Цисты хризифитов (золотистых водорослей) подсчитывались вместе со створками диатомей; были рассчитаны концентрации каждой группы кремнистых микрофоссилий и отношение «цисты : диатомеи».

3. Результаты и обсуждение

Самая нижняя часть отложений представлена ленточными глинами, накапливавшимися на дне Ладожского озера и на прилегающих к нему низменностям в эпоху позднеледникового, когда большие территории были заняты крупным приледниковым водоемом – Балтийским ледниковым озером (БЛО). Низкие значения ППП (< 2%), отмеченные в этих осадках, характерны для озерно-ледниковых глин в Ладожском озере (Субетто, 2002; Кузнецов и Субетто, 2021). Низкое содержание створок диатомовых водорослей и цист хризифитов, наблюдаемое в ленточных глинах озера Лавиярви, указывают на низкую продуктивность водной экосистемы. Подобные низкие концентрации кремнистых микроводорослей отмечались повсеместно в позднеледниковых отложениях Ладожского озера (История..., 1990; Лудикова, 2023).

Резкий переход к гиттиевой глине соответствует катастрофическому падению уровня БЛО ок. 10600 кал. л.н. Он сопровождался незначительным увеличением значений ППП и выраженным ростом концентраций створок диатомовых водорослей и цист хризифитов, указывающими на переход

к стадии “Ладожского залива” в эволюции озера Лавиярви. В начале этого этапа в составе диатомовых комплексов отмечено относительно высокое содержание видов, индикаторных для стадии пресноводной анциловой трансгрессии в балтийской котловине. Считается, что воды Анцилового озера проникали в Ладогу. Однако большинство индикаторных анциловых видов также характерны для пост-анциловых сообществ диатомовых водорослей Ладожского озера. Поэтому неясно, является ли их высокое содержание в отложениях раннего голоцена результатом непосредственного влияния Анцилового озера. Предыдущие палеолимнологические исследования показали, что анциловая трансгрессия в северной части Ладожской котловины компенсировалась продолжавшимся изостатическим поднятием, что нашло отражение в высоком процентном содержании бентосных диатомей (Давыдова и Субетто, 2000). Высокая доля диатомей бентоса и незначительное увеличение содержания планктонной *Aulacoseira subarctica* отмечались как в диатомовых комплексах озера Лавиярви, так и в других разрезах раннеголоценовых отложений Ладожского озера (Kostrova et al., 2019; Лудикова и Кузнецов, 2021).

Дальнейшее увеличение содержания органического вещества и накопление глинистой гиттии свидетельствуют о повышении продуктивности ладожской экосистемы в ходе продолжавшегося потепления климата. Планктонные виды начинают доминировать в составе диатомовых комплексов (> 70%). Наиболее многочисленна *Aulacoseira islandica*, массовый представитель ладожского фитопланктона в голоцене. Однако не вполне понятно, могло ли преобладание планктонных видов явиться результатом некоторого замедления изостатического поднятия северной части ладожского бассейна и опережавшего его повышения уровня озера. Значения отношения “цисты : диатомеи водоросли” в этот период также увеличиваются в отложениях озера Лавиярви, в отличие от разрезов центральной части Ладожского озера, где наиболее высокие значения были характерны для начала голо-

цена (Лудикова, 2023). Можно предположить, что в закрытых заливах Ладожского озера существовали более благоприятные условия для массового развития хризифитов по сравнению с его открытой частью.

Климатический оптимум голоцена, ок. 7700 кал. л.н., отчетливо выделяется высокими значениями ППП (9%) и значительными концентрациями створок диатомовых и цист золотистых водорослей. Несмотря на то, что планктонная *A. islandica* остается весьма многочисленной, в составе диатомовых комплексов к этому времени вновь устанавливается доминирование бентосных видов, что указывает на обширные площади мелководий в палео-заливе Ладожского озера.

Дальнейшее увеличение концентраций створок диатомей характерно для второй половины голоцена в Ладожском озере (История..., 1990). Синхронное увеличение содержания цист хризифитов, не отмечавшееся в других разрезах донных отложений (Лудикова, 2023), вероятно, отражает специфические условия среды, существовавшие в палео-заливе.

Переход к следующему этапу эволюции озера Лавиярви характеризуется резким снижением содержания органического вещества и изменениями в составе диатомовых комплексов. Согласно результатам радиоуглеродного датирования эти изменения произошли после 3900 кал. л.н. Они стали результатом падением уровня Ладоги вследствие образования около 3400 кал. л.н. нового стока – реки Невы. В ходе регрессии уровень Ладоги понизился до современных 5 м над у.м., осушились прибрежные низменности и на месте бывших ладожских заливов образовались небольшие изолированные озера.

4. Заключение

Лито- и биостратиграфическое изучение отложений озера Лавиярви, бывшего залива Ладожского озера, показало, что на более ранних стадиях в обоих бассейнах существовали сходные обстановки. Однако позднее в закрытом заливе сложились специфические условия, отличные от условий в откры-

той части Ладожского озера, что нашло отражение в динамике содержания органического вещества, составе диатомовых комплексов, абсолютном и относительном содержании цист хризифитов.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Государственной программы ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (FFZF–2024-0001) и при поддержке РНФ (24-17-00206).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Давыдова Н.Н., Субетто Д.А. 2000. Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным. В: Ладожское озеро. Петрозаводск, с. 66–75.

История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. 1990. Л.: Наука.

Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. 2021. Голоценовое накопление органического вещества в донных отложениях Ладожского озера // Геоморфология 52(2): 63-71. DOI:[10.31857/S043542812102005X](https://doi.org/10.31857/S043542812102005X)

Лудикова А.В. 2023. Использование цист Chrysophyceae для изучения развития экосистемы Ладожского озера в голоцене. В: Микрорепалеонтология: фундаментальные проблемы и вклад в региональное геологическое изучение недр. Труды XVIII Всероссийского микрорепалеонтологического совещания, с. 373-376.

Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. 2021. Кремнистые микроводоросли в донных отложениях Ладожского озера и их роль в палеолимнологических реконструкциях. Известия РГО 153(6): 46-64. DOI: [10.31857/S0869607121060033](https://doi.org/10.31857/S0869607121060033)

Субетто Д.А. 2002. Строение, особенности и история формирования донных отложений. В: Ладожское озеро. Прошлое, настоящее, будущее. СПб, с. 122-136.

Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L. et al. 2019. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes. Boreas 48: 361-376. DOI:[10.1111/bor.12385](https://doi.org/10.1111/bor.12385)

The history of lake Antyukh-Lambina (Kandalaksha coast of the White Sea) based on the study of bottom sediments

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYGrekov I.M.¹, Syrykh L.S.¹, Nazarova L.B.²¹Herzen University, Moika river 48-12, 191186, Saint-Petersburg, Russia²Kazan (Volga) Federal University, Kremlyovskaya str 18, 420008, Kazan, Russia

ABSTRACT. We performed a comprehensive analysis of the sediment cores from lake Antyukh-Lambina. Studied area is situated on the Kandalaksha coast of the White Sea. The lake is connected to lake Kolvitskoye by a narrow strait. We have identified several stages in the lake development from brackish to freshwater conditions, since the early Holocene. The desalination and increased organic matter in the sediment have led to an increase in diversity chironomid and cladocera species. Using chironomid analysis, we performed quantitative reconstructions of mean July air temperatures and water depths. The results showed that both parameters have increased gradually since the early Holocene.

Keywords: paleolimnology, Holocene, Kandalaksha coast, chironomids, lake sediments, Antyukh-Lambina, Kola peninsula

For citation: Grekov I.M., Syrykh L.S., Nazarova L.B. The History of the lake Antyukh-Lambina (Kandalaksha coast of the White Sea) based on the study of bottom sediments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 390-393. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-390

1. Introduction

The sediments from small lakes are valuable repositories of information regarding changes in the natural environment. The bottom sediments contain both mineral and organic components, which are of both autochthonous and allochthonous origin. A comprehensive study of these paleorecords provides information about the climatic and environmental changes in the surrounding area (Subetto, 2009; Subetto et al., 2017; Syrykh et al., 2021).

Lake Antyukh-Lambina represents an interesting case study from the perspective of the sedimentary record. The lake's basin is located in an area that has been impacted by Quaternary glaciation, neotectonic activity, sea level fluctuations and environment changes during the Late Glacial and Holocene. The Antyukh-Lambina lake deposits have the potential as a valuable record of development of the Kolvitskoe lake catchment area over past time.

2. Materials and methods

Lake Antyukh-Lambina (67.09°N 33.16°E; 59 a.s.l.) is a small lake: 200 m²; max.depth ca 6m. The Villaselga range separates Lake Antyukh-Lambina from

lake Kolvitskoe. Water exchange occurs through a narrow channel between lakes. A stream flows into Lake Antyukh-Lambina from the south, originating in the Kolvitskoe Tundra.

Within the study, we analyzed approximately 3 m. sediment core, which was extracted from a depth of 4 m., using a piston corer. Lithological analysis, radiocarbon dating, LOI (loss on ignition) analysis, paleobotanical analysis, and micropaleontological analysis were performed with the sediment samples.

3. Results and discussion

The lithological composition revealed that the gray silty clay is covered with brown gyttia-aleurite, with a gradual transition area in between. (Grekov and Kolka, 2016). There were no obvious disturbances in the stratigraphic sequence of the sedimentary deposits, indicating a continuous process of sedimentation throughout the Holocene period since the Preboreal period.

Based on the results of radiocarbon dating and lithostratigraphic and LOI analysis, three main zones can be identified in the studied sedimentary sequence.

A clear transition from a saline to a freshwater environment (6,21-6,2 m.) at the beginning of the lake's

*Corresponding author.

E-mail address: ivanmihgrekov@gmail.com (I.M. Grekov)

Received: June 05, 2024; Accepted: June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



history during the Early Holocene has been established based on diatom analysis results (Ludikova and Grekov, 2017).

In the lowermost part of the sequence (6.94–6.66 m.), during the deposition of the clay unit, the organic content is low, approximately 1–2%, indicating the presence of a large, low-productivity, saline, presumably glacially derived reservoir. In the higher part of the transition zone, at a depth of 6.66 to 6.19 m., there is a variation in the content of organic matter, ranging from 3.5% to 7%. The clay fraction is replaced by siltstone containing gyttia, indicating a transition from mineral sedimentation to organic sedimentation. In the higher part of the section (6.19 to 6.00 m.), it is possible to identify lithological facies by a distinct change in siltstone composition to a siltstone with gyttia with an increase in organic content up to 14%. Subsequently, until the end of the section (6.00 to 4.05 m.), stable reservoir performance is observed, with minor fluctuations in organic matter values (10–15%).

The dynamic of chironomid communities was consistent with changes in lithological stratigraphy and diatom assemblages. Significant changes in the chironomid taxonomic composition was identified in the lower part of the core (between 6.94 and 6.42 m.). The *Orthocladus* and *Cricotopus*, typically associated with freshwater habitats, might indicate past water level changes, possibly due to flooding of the surrounding area. *Chironomus plumosus*-type, tolerant of low oxygen content and unstable environmental conditions, was also found in the lower horizons. In the upper part of the core dominant *Tanytarsus lugens*-type was replaced by *Sergentia coracina*-type and *Zalutschia*. These changes might indicate an increase of water depth and a cooler climate in the catchment area. Subdominant *Heterotrissocladius marcidus*-type and *Heterotrissocladius maeeri*-type 1 indicated eutrophic conditions within the lake up to present time (Nazarova et al., 2023). Overall, changes in chironomid composition responded small fluctuations in climate in the region, with a notable warming trend during the Atlantic period (Syrykh et al., 2016).

At the same time, according to the reconstruction, the depth of the lake increased almost throughout the entire period of its development. The changes in the *Cladocera* community showed a similar pattern of lake development and response to changes in environmental and climatic conditions (Ibragimova et al., 2017).

4. Conclusions

A continuous sequence of accumulation of bottom sediments of the lake Antyukh-Lambina provides an opportunity to study the history of the formation

and development of the surrounding territories from the Early Holocene to modern times. The results of the research can be extrapolated to Kolvitskoe Lake, which is the largest in this area. Further studies of the lake will enable us to reconstruct the detailed environmental dynamics of the region.

Conflict of interest

The author declares that there is no conflict of interest requiring disclosure in this article.

References

- Grekov I.M., Kolka V.V. 2016. Paleolimnological studies of bottom sediments of lakes South of the Kola Peninsula. *Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the International Conference. Yakutsk, 22 -27 August*, pp. 44-47.
- Ibragimova A. G., Frolova L. A., Grekov I. M. et al. 2017. Changes in the composition of Cladocera (Brachiopoda, Crustacea) communities in Lake Antyukh-Lambina (Kola Peninsula, Murmansk Region) in the Holocene. *Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceedings of the 1st International Conference (September 11-15, 2017). Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, pp. 592-597.
- Ludikova A.V., Grekov I.M. 2017. Preliminary results of diatom analysis of samples of bottom sediments of the lake. Antyukh-Lambina (South of the Kola Peninsula). *Geography of the Arctic regions. Collective monograph based on the materials of the International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, A.I. Herzen State Pedagogical University, November 9-10, 2017. St. Petersburg: Printing House of LLC "Old Town"*, pp. 33-36.
- Nazarova L., Syrykh L., Grekov I. et al. 2023. Chironomid-Based Modern Summer Temperature Data Set and Inference Model for the Northwest European Part of Russia. *Water* 15: 976. DOI: [10.3390/w15050976](https://doi.org/10.3390/w15050976)
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. 2017. Paleolimnological Studies in Russian Northern Eurasia: A Review. *Contemporary Problems of Ecology* 10 (4): 327–335. DOI: [10.1134/S1995425517040102](https://doi.org/10.1134/S1995425517040102)
- Subetto D.A. 2009. Donnye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskie rekonstruktsii. *Monografiya (Bottom Lake Sediments: Paleolimnological Reconstructions. Monograph)*, St. Petersburg: Ross. Gos. Pedagog. Univ. im. A.I. Gertsena.
- Syrykh L., Nazarova L., Frolova L. et al. 2016. Development of the lake ecosystem, palaeoclimate and palaeoenvironment on the Kola Peninsula (NW Russia) as reconstructed from sediment record of the Lake Antyukh-Lambina. *SIL XXXIII congress 31 July-5 August 2016*.
- Syrykh L., Subetto D., Nazarova L. 2021. Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database. *J Paleolimnol* 65: 369–375. DOI: [10.1007/s10933-020-00172-8](https://doi.org/10.1007/s10933-020-00172-8)

История озера Антюх-Ламбина (Кандалакшский берег Белого моря) по данным изучения донных отложений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYГреков И.М.¹, Сырых Л.С.¹, Назарова Л.Б.²¹Российский государственный педагогический университет, наб. р. Мойки 48-12, 191186, Санкт-Петербург, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская 18, 420008, Казань, Россия

АННОТАЦИЯ. Керны донных отложений озера Антюх-Ламбина (Кандалакшский берег Белого моря) проанализированы комплексом методов. Озеро соединяется с озером Колвицкое узким каналом, через который происходит водообмен. Нами выделены несколько этапов в развитии озера, включая переход от солоноводного к пресному водоёму. Переход к пресноводным условиям и увеличение содержания органики в донных отложениях привели к увеличению разнообразия видов гидробионтов. По результатам хирономидного анализа проведена количественная реконструкция средних июльских температур воздуха и глубины воды. Оба параметра постепенно увеличивались с начала голоцена до настоящего времени.

Ключевые слова: палеолимнология, озерные отложения, Антюх-Ламбина, Кольский полуостров, Кандалакшский берег, хирономиды, Голоцен

Для цитирования: Греков И.М., Сырых Л.С., Назарова Л.Б. История озера Антюх-Ламбина (Кандалакшский берег Белого моря) по данным изучения донных отложений // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 390-393. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-390

1. Введение

Донные осадки малых озер являются ценными источниками информации об изменениях природной среды. Озерные осадки формируются в результате сноса с водосбора и формирования в самом озере. Комплексное изучение этих палеозаписей позволяет реконструировать динамику озерной экосистемы и изменение природно-климатических условий на водосборе (Subetto, 2009; Subetto et al., 2017; Syrykh et al., 2021).

Озеро Антюх-Ламбина (Кандалакшский берег Белого моря) расположено в районе, который подвергался воздействию различных природных событий в прошлом, включая: четвертичное оледенение, неотектоническую активность, колебания уровня моря и смену ландшафтов. Донные отложения озера Антюх-Ламбина представляет отдельный интерес для исследования, как ценный источник информации самого озера и окружающей территории в позднем неоплейстоцене и голоцене.

2. Материалы и методы

Озеро Антюх-Ламбина (67.09° с.ш. 33.16° в.д.; 59 м над уровнем моря) представляет собой неболь-

шое озеро, площадью около 200 м², с максимальной глубиной около 6 м. Гряда Вилласельга отделяет его от озера Колвицкое, водообмен с которым происходит через узкий канал. С юга в озеро Антюх-Ламбина впадает ручей, берущий начало в Колвицкой тундре.

Керн донных отложений мощностью около 3 метров был отобран с глубины 4 метра с использованием поршневого бура. В рамках исследования были проведены радиоуглеродное датирование, анализ ППП (потеря массы при прокаливании), литологический, палеоботанический и микропалеонтологический анализы донных отложений. На основе хирономидного анализа выполнена реконструкция средних июльских температур воздуха и глубины воды (Nazarova et al., 2023).

3. Результаты и обсуждение

Литологический анализ показал, что в основании исследованного разреза лежат серые илистые глины, которые перекрыты коричневым алевритом с органикой. Переход между горизонтами постепенный (Grekov and Kolka, 2016). По результатам радиоуглеродного датирования исследованный разрез охватывает переход от позднего неоплейстоцена

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ivanmihgrekov@gmail.com (И.М. Греков)

Поступила: 05 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



к голоцену и весь голоцен. В стратиграфической последовательности осадочных отложений не было заметных нарушений, что указывает на непрерывный процесс осадконакопления, начиная с пребореального периода.

На основе результатов радиоуглеродного датирования, литостратиграфического и анализа ППП, в изучаемой последовательности осадочных пород можно выделить три основные зоны.

Анализа диатомовых водорослей позволил установить постепенный переход от соленой среды к пресноводной в начале истории озера (6,21-6,2 м) в раннем голоцене (Лудикова и Греков, 2017).

В самой нижней части разреза (от 6,94 до 6,66 м), в глинистом горизонте, содержание органического вещества низкое, примерно 1–2%, что указывает на наличие большого, солоноводного низкопродуктивного, предположительно приледникового водоема. Выше, в переходной зоне на глубине от 6,66 до 6,19 м наблюдается вариация содержания органического вещества от 3,5% до 7%. Глинистая фракция заменяется алевритом, содержащим гиттию, что указывает на переход от минерального осадконакопления к органическому. В верхней части разреза (от 6,19 до 6,00 м) можно выделить литологические фации по отчетливому изменению состава алеврита на алеврит с гиттией с увеличением содержания органических веществ до 14%. Затем, до конца разреза (от 6,00 до 4,05 м), наблюдаются стабильные, с незначительными колебаниями, значения органического вещества (10-15%).

Динамика хирономидных сообществ соответствует изменениям в литологической стратиграфии и диатомовым водорослям. Значительная динамика численности и таксономического состава хирономид были выявлены в нижней части керна (между 6,94 и 6,42 м). Доминирующие здесь *Orthocladus* and *Cricotopus* могут указывать на динамику уровня воды и подтопление окружающей территории. В нижних горизонтах также был обнаружен вид *Chironomus plumosus*-type, устойчивый к низкому содержанию кислорода и нестабильным условиям окружающей среды.

В верх по разрезу фиксируется смена доминантных таксонов на *Tanytarsus lugens*-type, и затем *Sergentia coracina*-type и *Zalutschia*. Такие изменения могут свидетельствовать об увеличении глубины воды и более прохладном климате в водосборной области. Субдоминирующие *Heterotrissocladus marcidus*-type и *Heterotrissocladus maeeri*-type 1 указывают на эвтрофные условия в озере до настоящего времени. В целом, изменения в составе хирономид отражают небольшие колебания климата в регионе с заметным тепловым трендом во время Атлантического периода (Syrykh et al., 2016).

В то же время, согласно реконструкции, глубина озера увеличивалась практически на протяжении всего периода его развития. Изменения в сообществе *Cladocera* показали аналогичный сценарий развития озера и его реакцию на изменения природно-климатических условий (Ibragimova et al., 2017).

4. Заключение

Комплексный анализ донных отложений оз. Антюх-Ламбина показал развитие озера от солоноводного, глубокого водоема к пресному, относительно неглубокому эвтрофному озеру. Дальнейшие исследования озера позволят нам реконструировать детальную динамику окружающей среды региона. Полученные результаты могут быть использованы для исследования озера Колвицкое, которое является самым крупным в этом районе.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что в данной статье нет конфликта интересов, требующего раскрытия

Список литературы

- Лудикова А.В., Греков И.М. 2017. Предварительные результаты диатомового анализа проб донных отложений оз. Антюх-Ламбина (ЮЗ Кольского полуострова). География арктических регионов. Коллективная монография по материалам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, РГПУ им. А.И. Герцена, 9-10 ноября года. СПб.: Типография ООО «Старый город», С. 33-36.
- Субетто Д.А. 2009. Донные отложения озер. Палеолимнологические реконструкции. РГПУ им. А. И. Герцена. СПб. г. С. 344.
- Grekov I.M., Kolka V.V. 2016. Paleolimnological studies of bottom sediments of lakes South of the Kola Peninsula. Paleolimnology of Northern Eurasia. Experience, Methodology, Current Status: Proceedings of the International Conference. Yakutsk, 22 -27 August, pp. 44-47.
- Ibragimova A. G., Frolova L. A., Grekov I. M. et al. 2017. Changes in the composition of Cladocera (Brachiopoda, Crustacea) communities in Lake Antyukh-Lambina (Kola Peninsula, Murmansk Region) in the Holocene. Lakes of Eurasia: problems and solutions. Proceedings of the 1st International Conference (September 11-15, 2017). Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 592-597.
- Nazarova L., Syrykh L., Grekov I. et al. 2023. Chironomid-Based Modern Summer Temperature Data Set and Inference Model for the Northwest European Part of Russia. *Water*, 15, 976. DOI: [10.3390/w15050976](https://doi.org/10.3390/w15050976)
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. 2017. Paleolimnological Studies in Russian Northern Eurasia: A Review. *Contemporary Problems of Ecology* 10 (4): 327–335. DOI: [10.1134/S1995425517040102](https://doi.org/10.1134/S1995425517040102)
- Syrykh L., Nazarova L., Frolova L. et al. 2016. Development of the lake ecosystem, palaeoclimate and palaeoenvironment on the Kola Peninsula (NW Russia) as reconstructed from sediment record of the Lake Antyukh-Lambina. SIL XXXIII congress 31 July-5 August 2016.
- Syrykh L., Subetto D., Nazarova L. 2021. Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database. *J Paleolimnol* 65: 369–375. DOI: [10.1007/s10933-020-00172-8](https://doi.org/10.1007/s10933-020-00172-8)

Holocene environmental conditions in the Eastern Sayan foothills according to a comprehensive paleoecological study of the Sosnovka mire

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYGrenaderova A.V.^{1*}, Mikhailova A.B.¹, Sharafutdinov R.A.¹, Stoyko T.G.²¹ Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University», Svobodny str, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Penza State University», Krasnaya st., 40, Penza, 440026, Russia

ABSTRACT. This research is devoted to the study of the combined vegetation dynamics, hydroclimatic conditions and fires in the foothills of the Eastern Sayan northwestern macroslope in the Holocene. The paleoecological reconstruction results obtained on the basis of AMS-dating, pollen, macrofossils, charcoal and malacofaunal analysis of peat deposits of the Sosnovka mire (right bank of the Yenisei River), covering the last $\approx 11,000$ calendar years are presented. It was established that the process of waterlogging began at $\approx 9700-8500$ cal yr BP at the optimum heat and moisture, when the waterless valley were covered with a mixed siberian pine-spruce-fir forest, with the maximum participation of spruce and fir. According to the study of Sosnovka mire sediments the reaction of local and regional communities to the Holocene Thermal Maximum (7500-6000 years ago) was clearly manifested. The participation of spruce and fir in the trees layer stand decreased sharply. The increase in fire activity was noted, which contributed to the lightening of forests and greater development of the shrub layer. During this interval, the process of swamping actively began in the floodplains of rivers with a drainage area in the western part of the Eastern Sayan. Based on the results of charcoal analysis six stages of increased fire activity were identified: I – about 10,000-8,800 cal yr BP, II – 7500-7200, III – 5600-5000, IV – 3700-3000, V – 2100-1800, VI – 800 cal yr BP - until now.

Keywords: vegetation and climate reconstruction, Holocene, peat deposits, mollusks, fires, oxbow lake, Eastern Sayan

For citation: Grenaderova A.V., Mikhailova A.B., Sharafutdinov R.A., Stoyko T.G. Holocene environmental conditions in the Eastern Sayan foothills according to a comprehensive paleoecological study of the Sosnovka mire // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 394-399. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-394](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-394)

1. Introduction

Currently, there is an acute problem of studying the natural systems response of to global climate change. Of particular interest is understanding the trends in the forest communities development in response to changes in heat and moisture conditions, including adaptation to climate drying conditions and recovery after the impact of the pyrogenic factor. At the moment, paleoecological conditions and the environmental changes in the western part of the Eastern Sayan have been studied to a lesser extent within the Altai-Sayan region.

2. Materials and methods

The object of this study is the deposits of the Sosnovka mire, which located within the right-bank floodplain complex of the Kan River (Irbeysky district, Krasnoyarsk Territory, southeast of the Irbeyskoye village), in the southern part of the Rybinsk depression, in the periorogenic region of the Eastern Sayan and the Siberian platform (Nikolaev and Chernov, 1988). The total area of the mire is 940 hectares. The modern vegetation cover is represented by a wet peatland birch forest with larch, pine, sphagnum and green moss.

Drilling was carried out using an Eijkelkamp Peat sampler, at a point with coordinates $55^{\circ}39'14.2''N$, $95^{\circ}36'27.9''E$, absolute elevation is 261 m. The total thickness of the deposits is 430 cm, sampling in 5 cm increments, the total number of samples is 71. In the depth range of 0-400 cm, sediments are represented

*Corresponding author.

E-mail address: grenaderova-anna@mail.ru (A.V. Grenaderova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



by peat, in the range of 400-430 cm - by oxbow lakes sediments, including plant detritus and mollusk shells. The interval 400-325 cm was not covered by the analysis due to high water content, the sediments were fluid (liquid) saturated with water and could not be taken in the form of borehole cores.

The samples were studied using a complex methods: pollen (Grichuk and Zaklinskaya, 1948), macrofossils (Kulikova, 1974), charcoal (Clark, 1988) and malacofaunal analysis. Minerals of various size fractions were studied by scanning electron microscopy using a TESCAN VEGA 3 SBH microscope with an OxfordX-Act energy-dispersive microanalysis system. The main minerals composing the sediments were identified and their morphological features were established. Radiocarbon analysis of six samples was carried out in the laboratory of isotope research of the Cenozoic Geochronology Center of the Institute of Archeology and Ethnography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and the Accelerator Mass Spectrometry Center of the NSU-NSC. Calibration of radiocarbon dates and construction of a depth-age model was carried out using the Intcal20 calibration curve in the “Bchron” package of the R. (Reimer et al., 2020).

3. Results and discussion

The peat deposit is eutrophic type, composed almost entirely of sedge peat. At certain stages a slight increase in the role of hypnum mosses and bog herbs was noted. The lower part of the thickness is represented by alternating layers of fine-grained sand and medium-textured loam, reflecting various stages of sedimentation of floodplain and oxbow sediments under conditions of oxbow lake separation (about 11,000 cal yr BP) with its gradual siltation and overgrowth. The identified mollusk shells belong to inhabitants of open, unforested landscapes (*Vallonia pulchella* (Muller, 1774), *Vallonia tenuilabris* (Al. Braun, 1842) - an indicator of the “cold steppes” (Lozek, 1964) and the “steppe tundra” (Horsák, 2015), *Pupilla muscorum* (Linnaeus, 1758) and *Cochlicopa nitens* (Gallenstein, 1852), which may indicate cold, treeless landscapes with high humidity. According to the pollen analysis, sedge-fern communities grew in the floodplain, the tree layer of the waterless valley was sparse and represented by fir (*Abies sibirica* Ledeb.), spruce (*Picea obovata* Ledeb.) and siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour). Consistent eutrophication of the oxbow lake against the background of changes in regional heat and moisture supply led to the appearance of mire communities in place of the open water surface \approx 9700 years ago.

For \approx 9700-7500 cal yr BP the waterless valley were covered with mixed siberian pine-spruce-fir forest. The total share of pollen of dark coniferous plants in the pollen spectrum reached 68% - the maximum extreme for the entire reconstruction period. The significant participation of fir in forest ecosystems (25-32%) can be considered as a manifestation of a response to favorable conditions of heat and moisture supply.

Starting at 7500 cal yr BP in the study area the response of plant communities to the Holocene Thermal

Maximum (7500-6000 cal yr BP), which manifested itself in warming and increased aridization (Khotinsky, 1977), is clearly visible. The participation of spruce and fir of the forests has sharply decreased (by 4-5 times). An increase in fire activity (7500-7200 cal yr BP), the lightening of forests and the development of the shrub layer have been noted. The driest air is found in the interval 6800-5550 cal yr BP (fir pollen content - 1.3-2.8%). At this time, the process of bog formation of floodplains in the foothills and low mountains began actively.

Long time 5550-3800 cal yr BP on waterless valley siberian pine forests with fir, spruce and pine (*Pinus sylvestris* L.) were common with slight variations in the composition of the forest stand (the ratio of dark coniferous/light coniferous pollen averaged 44% to 39%). Based on the numerical value and species diversity of mollusk shells intervals were identified indicating an increase in water content (5450-5350 cal yr BP) and a decrease in water supply (5320-5020 cal yr BP; 4860-4150 cal yr BP).

Later (3800-3600 cal yr BP) an increase in the proportion of *Pinus sylvestris* L. was noted in the composition of the spectrum to 46% - the maximum since the beginning of the mire formation process. The share of grasses in the pollen spectrum has increased to 11%; grasses are represented by 16 taxa - maximum diversity). An increase in fire activity is recorded (the rate of accumulation of charcoal particles is about 250 particles per 1 cm² per year).

After 3600 cal. yr BP there was a gradual increase in moisture an increase in the pollen content of fir and spruce in the spectrum, moisture-loving *Typha*, *Lycopodium dubium*, ferns Ophyoglossaceae and Polypodiaceae were noted with spore composition 85%. Thanatocenosis in the range of 2960-2180 cal yr BP included maximum diversity (10 taxa), including representatives of bivalves (subfamily Euglesinae, subfamily Sphaeriinae). The proportion of aquatic mollusks shells was numerically predominant with a maximum in the interval of 2300-2230 cal yr BP. The maximum of *Pinus sibirica* pollen (38.3%) occurred at 2230-2180 cal yr BP.

Period 2000-1800 cal yr BP distinguished by the reduction of *Pinus sibirica* (28%), *Larix* was noted - 0.6%, among spores the participation of green moss reached 70%. At this time, there was an increase in fire activity, which collectively indicated a decrease in moisture. Next in 1800-1300 cal yr BP the share of dark conifers in the composition of the spectrum increased to an average of 46.5%, which may indicated a decrease in the lower limit of the forest in the western part of the Eastern Sayan. Due to the lack of reliable dates above the interval of 95-90 cm, it is very difficult to interpret the dynamics of conditions with age reference.

4. Conclusion

The resulting reconstruction of the Sosnovka mire allows us to trace changes in the environmental conditions over the last \approx 11,000 years in the forest-steppe zone ecotone - a zone of decreasing low mountains on the northwestern macroslope of the Eastern Sayan. An

integrated paleoecological approach, based on indicators of plant and animal origin, made it possible to identify the response of communities to the main climatic trends of the Holocene. Thus, the most significant expansion of the range of dark conifers (*Abies sibirica*, *Picea obovata*) occurred at \approx 9700-7500 yr BP and can be considered as a manifestation of a response to favorable conditions of heat and moisture supply. The period 1800-1300 cal yr BP (dominant *Pinus sibirica*) can be correlated with the response to the Cooling of the Dark Ages. Changes in climatic conditions towards a decrease in moisture supply, increased continentality 7500-6000 cal yr BP, 3800-3600 and 2000-1800 cal yr BP contributed to the rise of the lower limit of dark conifers and increased fire activity.

5. Acknowledgments

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Clark J. S. 1988. Particle motion and the theory of stratigraphic charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary research* 30: 67-80. DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application to paleogeography. Moscow: Geographgiz. (in Russian)
- Horsák M. 2015. European glacial relict snails and plants: environmental context of their modern refugial occurrence in southern Siberia. *BOREAS* 4 (44): 638–657. DOI: [10.1111/bor.12133](https://doi.org/10.1111/bor.12133)
- Khotinsky N.A. 1977. Holocene of Northern Eurasia: Experience of transcontinental correlation of stages of development of vegetation and climate. Moscow: Science. (in Russian)
- Kulikova G.G. 1974. A short guide to the botanical analysis of peat. Moscow: Moscow University Publishing House. (in Russian)
- Ložek V. 1964. Quartermollusken der Tschechoslowakei. *Rozpr. Ustred. Ustavu Geol.* (in German)
- Nikolaev V.A., Chernov A.F. 1988. Relief of the Altai-Sayan mountain region. Novosibirsk: Science. (in Russian)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62 (4): 725–757. DOI: [10.1017/rdc.2020.41](https://doi.org/10.1017/rdc.2020.41)

Природные условия голоцена в предгорье Восточного Саяна по данным комплексного палеоэкологического исследования болота Сосновка

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYГренадерова А.В.¹, Михайлова А.Б.¹, Шарафутдинов Р.А.¹, Стойко Т.Г.²¹Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия²Пензенский государственный университет, ул. Красная, 40, Пенза, 440026, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследование посвящено изучению динамики растительности, гидроклиматических условий и пожаров в предгорье северо-западного макросклона Восточного Саяна. Приводятся результаты палеоэкологической реконструкции, полученной на основе AMS датирования, спорово-пыльцевого, ботанического, палеоантракологического и малакофаунистического анализа отложений болота Сосновка (правобережье р.Енисей), охватывающие последние ≈ 11000 календарных лет. Установлено, что процесс заболачивания начался $\approx 9700-8500$ кал. л. н. в оптимум тепло- и влагообеспеченности, когда суходолы были покрыты смешанным кедрово-елово-пихтовым лесом с максимальным участием ели и пихты. В строении толщи Сосновка отчетливо проявилась реакция на термический оптимум голоцена (7500-6000 л. н.): сокращение участия ели и пихты в составе древостоя, усиление пожарной активности, осветление лесов, начало заболачивания в поймах рек с водосбором в предгорье западной части Восточного Саяна. Выделено шесть этапов усиления пожарной активности: I – около 10000-8800 кал. л. н., II – 7500-7200, III – 5600-5000, IV – 3700-3000, V – 2100-1800, VI – 800 кал. л. н. – по настоящее время.

Ключевые слова: реконструкция растительности и климата, голоцен, торфяные отложения, моллюски, пожары, старица, Восточный Саян

Для цитирования: Гренадерова А.В., Михайлова А.Б., Шарафутдинов Р.А., Стойко Т.Г. Природные условия голоцена в предгорье Восточного Саяна по данным комплексного палеоэкологического исследования болота Сосновка // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 394-399. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-394](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-394)

1. Введение

В настоящее время остро стоит проблема изучения отклика природных систем на глобальное изменение климата. Особый интерес представляет понимание тенденций развития лесных сообществ в ответ на изменение тепло- и влагообеспеченности, в том числе адаптации к условиям иссушения климата и восстановления после воздействия пирогенного фактора. На сегодняшний день в пределах Алтае-Саянского региона в меньшей степени изучены палеоэкологические условия в западной части Восточного Саяна.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являются отложения болота Сосновка, которое располагается в пределах правобережного пойменного комплекса реки Кан

(Ирбейский район, Красноярский край, на юго-восток от с.Ирбейское) в южной части Рыбинской впадины в перигорной области Восточного Саяна и Сибирской платформы (Николаев и Чернов, 1988). Общая площадь болота – 940 га. Современный растительный покров представлен заболоченным березняком разнотравно-сфагново-зеленомошным.

Бурение выполнено с помощью пробоотборника Eijkelkamp Peat sampler в точке с координатами 55°39'14.2"с.ш., 95°36'27.9"в.д. и абсолютной отметкой 261 м. Общая мощность изученной колонки составляет 430 см, опробование выполнено с шагом 5 см, общее количество проб – 71 шт. В диапазоне глубин 0-400 см отложения представлены торфом, в интервале 400-430 см – старичными осадками, включающими растительный детрит и раковины моллюсков. Интервал 400-325 см не охвачен анализом, по причине высокой обводненности, отложения были текучими (жидкими).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: grenaderova-anna@mail.ru (А.В. Гренадерова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Образцы изучены комплексом методов: спорово-пыльцевой (Гричук и Заклинская, 1948), ботанический (Куликова, 1974), палеоантракологический (Clark, 1988) и малакофаунистический анализ. Минералы различных размерных фракций изучены методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH с системой энергодисперсионного микроанализа OxfordX-Act. Радиоуглеродный анализ шести проб выполнен в лаборатории изотопных исследований ЦКП «Геохронология кайнозоя» ИАЭТ СО РАН и ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ. Калибровка радиоуглеродных дат и построение глубинно-возрастной модели проводилась по калибровочной кривой *intcal20* в пакете «*Bchron*» среды R. (Reimer et al., 2020).

3. Результаты и обсуждение

Торфяная залежь низинного типа, сложена преимущественно осоковым видом торфа, в отдельные этапы отмечалось незначительное усиление роли гипновых мхов и болотного разнотравья. Нижняя часть толщи представлена чередованием слоев мелкозернистых песков, тяжелых и средних суглинков, отражающих различные этапы седиментации пойменных и старичных отложений в условиях отшнуровывания старицы (около 11000 кал. л. н.) с постепенным ее заилением и зарастанием.

Идентифицированные раковины моллюсков принадлежат обитателям открытых, незалесенных ландшафтов (*Vallonia pulchella*, *Vallonia tenuilabris* – индикатор «холодных степей» (Lozek, 1964) и «степной тундры» (Horsák et al., 2015), *Pupilla muscorum* и *Cochlicopa nitens*, что может свидетельствовать о холодных безлесных ландшафтах с высоким увлажнением. Согласно данным спорово-пыльцевого анализа, в пойме произрастали осоково-папоротниковые сообщества, древесный ярус суходолов был разрежен и представлен пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.), елью (*Picea obovata* Ledeb.) и кедром (*Pinus sibirica* Du Tour). Последовательное эвтрофирование старицы, на фоне изменения региональной тепло- и влагообеспеченности, привело \approx 9700 л.н. к появлению болотных сообществ на месте открытой водной поверхности.

На протяжении \approx 9700-7500 кал. л. н. суходолы были покрыты смешанным кедрово-елово-пихтовым лесом. Суммарная доля пыльцы темнохвойных растений в составе пыльцевого спектра достигло 68% – максимум за весь период реконструкции. Значительное участие пихты в составе лесов (25-32% в составе спектра) можно рассматривать как проявление отклика на благоприятные условия тепло- и влагообеспеченности.

Начиная с 7500 кал. л. н. в исследуемом районе хорошо прослеживается реакция растительных сообществ на термический максимум голоцена (7500-6000 кал. л. н.), проявившийся в потепление и усиление аридизации (Хотинский, 1977). Участие ели и пихты в составе древостоя резко сократилось (в 4-5 раз в составе спектра), отмечено уси-

ление пожарной активности (7500-7200 кал. л. н.), осветление лесов и развитие кустарникового яруса. Наибольшей сухостью воздуха отличается интервал 6800-5550 кал. л.н. (содержание пыльцы пихты – 1,3-2,8%), в это время активно начался процесс заболачивания пойм в предгорье и низкогорье, фиксируется высокая концентрация частиц макроугля.

Длительное время 5550-3800 кал. л. н. на суходолах были распространены кедровые с пихтой, елью и сосной (*Pinus sylvestris* L.) леса, с небольшими вариациями в составе древостоя (соотношение пыльцы темнохвойных/светлохвойных составило в среднем 44% к 39%). По структуре танатоценоза моллюсков выделены интервалы указывающие на увеличение (5450-5350 кал.л.н.) и снижение обводненности (5320-5020 и 4860-4150 кал.л.н.).

Позже, 3800-3600 кал. л. н. в составе спектра отмечено увеличение доли *Pinus sylvestris* L. до 46% – максимум с начала процесса болотообразования, доля травянистых в составе пыльцевого спектра возросла до 11%, травы представлены 16 таксонами – максимум разнообразия, фиксируется усиление пожарной активности (скорость аккумуляции частиц угля около 250 частиц на 1 см² в год). После 3600 кал. л. н. наблюдается рост содержания пыльцы пихты и ели, отмечены влаголюбивые *Typha*, *Lycopodium dubium*, папоротники сем. *Ophyoglossaceae*, доля *Polypodiaceae* в составе споровых – 85%. Танатоценоз в интервале 2960-2180 кал. л. н. включает максимальное разнообразие (10 таксонов), в том числе представителей двустворчатых моллюсков (подсемейство *Euglesinae*, подсемейство *Sphaeriinae*), доля водных моллюсков численно преобладает с максимумом в интервал 2300-2230 кал. л. н. Максимальный экстремум содержания пыльцы *Pinus sibirica* (38,3%) приходится на 2230-2120 кал. л. н.

Период 2000-1800 кал. л. н. отличается сокращением *Pinus sibirica* (28% в спс), отмечена *Larix* – 0,6%, среди споровых участие зеленого мха достигает 70%. На это время приходится усиление пожарной активности, что в совокупности указывает на снижение увлажнения. Далее 1800-1300 кал. л. н. доля темнохвойных в составе спектра увеличивается в среднем до 46,5%, что может указывать на снижение нижней границы леса в западной части Восточного Саяна. В связи с отсутствием достоверных дат выше интервала 95-90 см, интерпретировать динамику условий с возрастной привязкой весьма затруднительно.

4. Заключение

Полученная реконструкция «Болото Сосновка» позволяет проследить изменение природной среды за последние \approx 11000 лет в экотоне лесостепная зона – зона снижающихся низкогорий северо-западного макросклона Восточного Саяна. Комплексный палеоэкологический подход, опирающийся на индикаторы растительного и животного происхождения, позволил выявить отклик сообществ на основные климатические тенденции

голоцена. Так, наиболее значительное расширение ареала темнохвойных (*Abies sibirica*, *Picea obovata*) пришлось на $\approx 9700-7500$ кал. л. н. и может рассматриваться как проявление отклика на благоприятные условия тепло- и влагообеспеченности, а период 1800-1300 кал.л.н. (доминант *Pinus sibirica*) можно соотнести с откликом на Похолодание темных веков. Изменение климатических условий в сторону снижения влагообеспеченности, усиление континентальности 7500-6000 кал.л.н., 3800-3600 и 2000-1800 кал.л. способствовало подъему нижней границы темнохвойных, усилению пожарной активности.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географгиз.

Куликова Г.Г. 1974. Краткое пособие к ботаническому анализу торфа. М.: Изд-во Московского университета.

Николаев В.А., Чернов А.Ф. 1988. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука.

Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии: Опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. Москва: Наука.

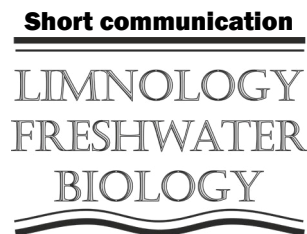
Clark J.S. 1988. Particle Motion and the Theory of Charcoal Analysis: Source Area, Transport, Deposition, and Sampling. *Quaternary Research* 30: 67–80. DOI: [10.1016/0033-5894\(88\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90088-9)

Horsák M., Chytrý M., Hájková P. et al. 2015. European glacial relict snails and plants: environmental context of their modern refugial occurrence in southern Siberia. *BOREAS*. 4 (44): 638–657.

Ložek, V. 1964. Quartermollusken der Tschechoslowakei. V. Ložek. – Rozpr. Ustred. Ustavu Geol.

Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 62(4): 725–757. DOI: [10.1017/rdc.2020.41](https://doi.org/10.1017/rdc.2020.41)

Distribution of mercury in lakes of different landscape zones in the south of Western Siberia using the example of model objects along a meridional transect



Malov V.I.*, Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I.

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ave. Academician Koptyug, 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The work presents data on the concentration of mercury in bottom sediments of lakes, which are characterized by the nival type of sedimentogenesis. The mercury content for bottom sediments of lakes sampled in the middle and high mountains of the Altai Mountains is on average 0.06 µg/g. Differences in mercury concentration values for high- and mid-mountain lakes have not been established. It has been established that, regardless of the type of sedimentogenesis in lakes of different landscape zones of the south of Western Siberia along the meridional transect, the distribution of mercury along the section is characterized by an increase in values up the section towards the bottom sediments-water boundary, where they reach maximum values.

Keywords: bottom sediments, mercury, geochemistry

For citation: Malov V.I., Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I. Distribution of mercury in lakes of different landscape zones in the south of Western Siberia using the example of model objects along a meridional transect // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 400-405. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-400

1. Introduction

Hg is among the ten most dangerous chemicals due to its high mobility and bioaccumulative ability (WHO, 2017). In aquatic ecosystems, Hg can be converted to methylmercury, a more toxic form that accumulates in aquatic food chains. One of the main objects of the freshwater ecosystem is the lake.

The purpose of this work is to compare the distribution of mercury in the bottom sediments of lakes of different landscape zones in the south of Western Siberia.

2. Materials and methods

The object of the study is small lakes in the south of western Siberia. The lakes are located in the south-eastern part of the West Siberian platform bordering the Altai-Sayan folded region, within the Ob-Irtysh interfluvium, and some of the lakes are located on the territory of the Altai Mountains (Ukok plateau, Ulagan valley). A total of 81 lakes were studied, belonging to different landscape zones: South taiga sub-Siberian landscape - 11, Subtaiga West Siberian landscape - 5 lakes, Forest-steppe West Siberian landscape - 30 lakes,

Steppe typical West Siberian landscape - 11 lakes, Mid-mountain belt of larch and cedar-larch forests - 4 lakes, High mountain char belt - 7 lakes, extrazonal landscapes (ribbon forests) - 13 lakes.

The choice of model lakes is due to the desire to cover all classes of sapropel (classification of Corde V.I. with modifications by Strakhovenko V.D.) for all types of sedimentogenesis characteristic of the studied landscape zones.

Sampling is carried out by a continuous core to the entire depth of the bottom sediments using a cylindrical sampler with a vacuum seal «Typhoon» (d - 82 mm and L - 120 cm).

Analytical work was carried out at the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk, Russia.

The total mercury content in the samples is determined according to the method M 03-09-2013 on the analyzer «RA-915M» with the prefix «RP-91C».

3. Results and Discussion

The mercury content in individual lakes, lake systems of the taiga, subtaiga, forest-steppe, steppe, and ribbon forests has been published in detail in

*Corresponding author.

E-mail address: Malov@igm.nsc.ru (V.I. Malov)

Received: June 04, 2024; **Accepted:** July 05, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Table 1. Mercury concentration ($\mu\text{g/g}$) in bottom sediments of lakes belonging to different types of sedimentogenesis. The data is presented in the format average value (min.value – max.value).

types of sedimentogenesis	classes of sapropel		
	Si class	Ca class	mixed class
humid	0.06 (0.02 – 0.18)	0.02 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.05)
arid	0.02 (0.004 – 0.04)	0.025 (0.02–0.03)	0.06 (0.02 –0.17)
nival	0.05 (0.02–0.12)	n.d	0.2

Note: n.d - no data

earlier works by the authors (Gavshin et al., 1999; Strakhovenko et al., 2010; Malikova and Strakhovenko, 2017; Strakhovenko et al., 2022, etc.) (Table 1).

The mercury content for bottom sediments of lakes sampled in the midlands and highlands varies from 0.02 $\mu\text{g/g}$ to 0.20 $\mu\text{g/g}$ and is on average 0.06 $\mu\text{g/g}$. It is worth noting that there are no fundamental differences in the mercury concentration values for the lakes of the highlands and the middle mountains. So the average value for the highlands is 0.04 $\mu\text{g/g}$, and for the highlands – 0.05 $\mu\text{g/g}$.

All the selected bottom sediments of the lakes of the Altai Mountains can be attributed mainly to the siliceous class. Only one lake (Lake Turquoise) can be classified as a mixed class. No lakes whose bottom sediments can be classified as Ca class were selected, which is most likely a characteristic of the nival type of sedimentogenesis of the Altai Mountains. The concentration of mercury ($\mu\text{g/g}$) in the bottom sediments of lakes, depending on the class, is shown in Table 1 (Table 1). In lakes characterized by the nival type of sedimentogenesis, in general, the same values of mercury concentrations are characteristic as for lakes characterized by the humid and arid type of sedimentogenesis.

The maximum observed values of mercury concentrations (0.2 $\mu\text{g/g}$) are observed for the island of Turquoise, which alone forms a sample of bottom sediments with a mixed class of bottom sediments. The excellent high mercury concentrations in the bottom sediments of this lake are explained by the proximity of the Aktash mercury deposit.

The study of the vertical distribution of mercury showed that the bottom sediments of lakes of all types of sedimentogenesis are characterized by an increase in concentrations towards the top of the section, where maximum values are reached (Fig. 1).

Atmospheric precipitation in the form of precipitation is the main natural sources of mercury for lakes in the catchment area of which there are no mercury-containing rocks (Louis et al., 2016.). This fact is fully confirmed by the similar nature of the distribution of mercury in the bottom sediments of lakes belonging to different landscape zones of the south of Western Siberia. The characteristic increase in mercury concentrations in the upper part of lake sediments is explained by the increase in mercury emissions into the atmosphere in modern times (Streets et al., 2017)

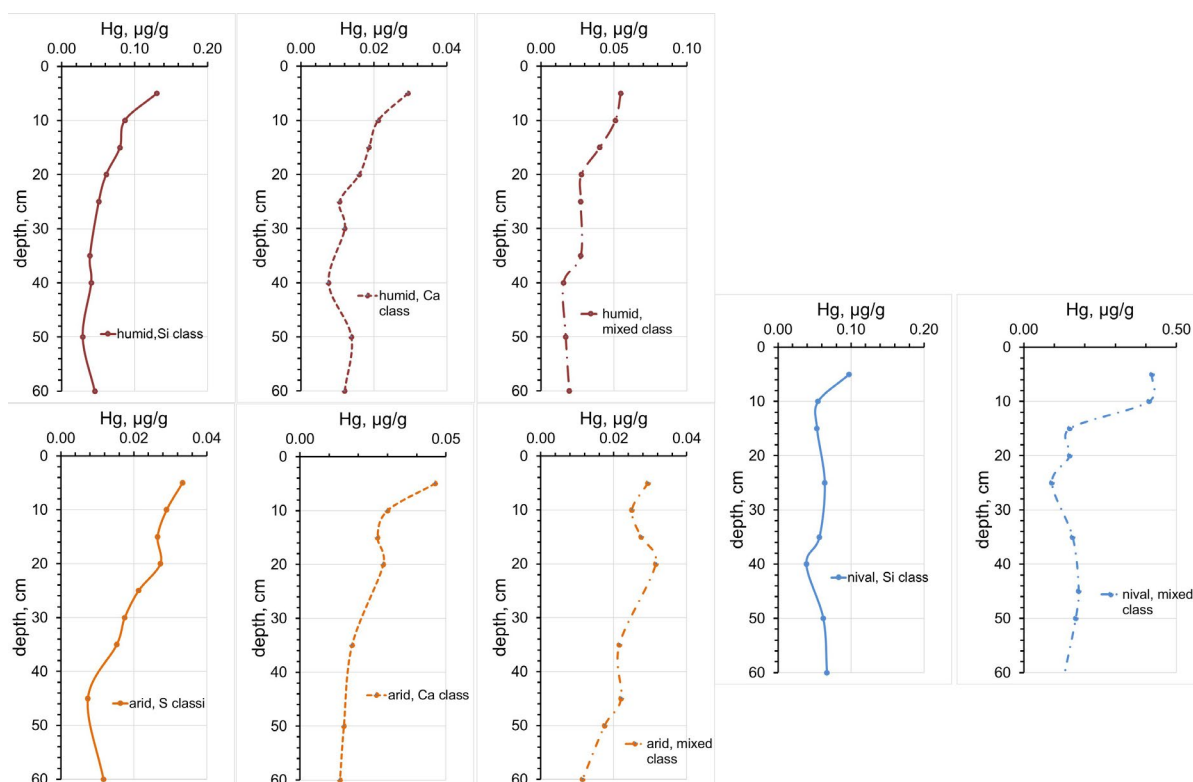


Fig.1. Vertical distributions of mercury concentrations in the average columns of bottom sediments for lakes belonging to different types of sedimentogenesis.

4. Conclusions

The results obtained allow us to draw the following conclusions.

The mercury content for the bottom sediments of lakes sampled in the middle mountains and highlands of the Altai Mountains is on average 0.06 µg/g, which is close to the values for lakes of other landscape zones in the south of Western Siberia. There are no differences in mercury concentration values for the lakes of the highlands and the Middle mountains. Regardless of the type of sedimentogenesis in lakes of different landscape zones in the south of Western Siberia along the meridional transect, the distribution of mercury along the section is characterized by an increase in values to the top of the section, which is explained by an increase in the flow of mercury from the atmosphere in modern times.

5. Acknowledgments

The study was carried out at the expense of a grant Russian Science Foundation № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Gavshin V.M., Kutsenogiy K.P., Strakhovenko V.D. et al. 1999. Assessment of changes in the geochemical background in the landscapes of Western Siberia under the influence of technogenic loads throughout the 20th century (No. 97-05-65235). Russian Foundation for Basic Research. (in Russian)
- Louis St. V., Graydon J., Mitchell C. et al. 2016. Mercury fate and methylation in terrestrial upland and wetland environments In Canada. Mercury Science Assessment.
- Malikova I.N., Strakhovenko V.D. 2017. Microelements in bottom sediments of lakes in Siberia landscape zones. In water and ecological problems of Siberia and Central Asia.132-141. (in Russian)
- Strakhovenko V.D., Malov V.I., Malov G.I. et al. 2022. Spatio-temporal distribution of gross mercury contents in the bottom sediments of small lakes of the taiga zone. *Limnology and Freshwater Biology*. 1262-1265. DOI [10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262)
- Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N. et al. 2010. The regularities of distribution of radionuclides and reare-earth elements in bottom sediments of Siberian lakes. *Russian Geology and Geophysics* 51(11): 1167-1178.
- Streets D.G., Horowitz H.M., Jacob D.J. et al. 2017. Total mercury released to the environment by human activities. *Environmental science & technology* 51(11): 5969-5977. DOI [10.1021/acs.est.7b00451](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00451)
- WHO. 2017. Ten chemicals of major health concern. Retrieved from www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/index.html

Распределение ртути в озерах разных ландшафтных зон юга Западной Сибири на примере модельных объектов вдоль меридионального трансекта

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Малов В.И.* , Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения РАН, пр-т Академика Коптюга 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены данные о концентрации ртути в донных отложениях озер для которых характерен нивальный тип седиментогенеза. Содержание ртути для донных отложений озер, отобранных в среднегорье и высокогорье Горного Алтая в среднем равно 0.06 мкг/г. Различий в значениях концентрации ртути для озер высокогорья и среднегорья не установлено. Установлено, что в независимости от типа седиментогенеза в озерах разных ландшафтных зон юга Западной Сибири вдоль меридионального трансекта распределение ртути по разрезу характеризуется увеличением значений в верх по разрезу к границе донные отложения- вода, где достигают максимальные значения.

Ключевые слова: донные отложения, ртуть, геохимия

Для цитирования: Малов В.И., Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И. Распределение ртути в озерах разных ландшафтных зон юга Западной Сибири на примере модельных объектов вдоль меридионального трансекта // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 400-405. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-400

1. Введение

Hg входит в десятку наиболее опасных химических веществ из-за ее высокой мобильности и биоаккумуляционной способности (WHO, 2017). В водных экосистемах Hg может перобразовываться в метилртуть, более токсичную форму, которая биоаккумулируется в водных пищевых цепях. Одним из главных объектов пресноводной экосистемы является озеро.

Целью данной работы является сравнение распределения ртути в донных отложениях озер разных ландшафтных зон юга Западной Сибири.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являются малые озера юга западной Сибири. Озера расположены в юго-восточной части Западно-Сибирской платформы граничащей с Алтае-Саянской складчатой областью, в пределах Обь-Иртышского междуречья, также часть озёр расположены на территории Горного Алтая (плато Укок, Улаганская долина). Всего исследовано 81 озеро, относящихся к разным ландшафтным зонам: Южнотаежный западноси-

бирский – 11, Подтаёжный западносибирский ландшафт – 5 озер, Лесостепной западносибирский ландшафт – 30 озер, Степной типичный западносибирский ландшафт – 11 озер, Среднегорный пояс лиственных и кедрово-лиственных лесов – 4 озера, Высокогорный гольцовый пояс – 7 озер, экстремальные ландшафты (ленточные боры) – 13 озер.

Выбор модельных озер обусловлен желанием охватить все классы сапропелей (классификация Кордэ В.И. с доработками Страховенко В.Д.) для всех типов седиментогенеза, характерных для исследуемых ландшафтных зон.

Пробоотбор производится непрерывным керном на всю глубину донных отложений при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (d - 82 мм и L - 120 см).

Аналитическая работа проводилась в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия.

Валовое содержание ртути в пробах определяется по методике М 03-09-2013 на анализаторе «РА-915М» с приставкой «РП-91С».

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: Malov@igm.nsc.ru (В.И. Малов)

Поступила: 04 июня 2024; Принята: 05 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024



Таблица 1. Концентрация ртути (мкг/г) в донных отложениях озер, относящихся к разным типам седиментогенеза. Данные представлены в формате ср.знач (мин.знач – макс.знач).

Тип седиментогенеза	класс сапропелей		
	Si	Ca	смешанный
Гумидный(тайга, подтайга, лесостепь)	0.06 (0.02 – 0.18)	0.02 (0.01–0.04)	0.03 (0.01–0.05)
Аридный(степь, ленточные боры)	0.02 (0.004 – 0.04)	0.025 (0.02–0.03)	0.06 (0.02 – 0.17)
Нивальный(среднегорье, высокогорье)	0.05 (0.02–0.12)	н.д	0.2

Примечание: н.д. - нет данных

3. Результаты и обсуждение

Содержание ртути в отдельно взятых озерах, озерных системах тайги, подтайги, лесостепи, степи, ленточных боров подробно опубликованы в более ранних работах авторов (Gavshin et al., 1999; Strakhovenko et al., 2010; Malikova and Strakhovenko, 2017; Strakhovenko et al., 2022 etc.) (Таблица 1).

Содержание ртути для донных отложений озер, отобранных в среднегорье и высокогорье варьирует от 0.02 мкг/г до 0.20 мкг/г и в среднем равно 0.06 мкг/г. Стоит отметить что принципиальных различий в значениях концентрации ртути для озер высокогорья и среднегорья не установлены. Так средние значение для высокогорья равно 0.04 мкг/г, а для высокогорья – 0.05мкг/г.

Все отобранные донные отложения озер Горного Алтая можно отнести преимущественно к кремнистому классу. Лишь одно озеро (о. Бирюзовое) можно отнести к смешанному классу. Озер, чьи донные отложения можно отнести к Са классу отобрано не было, что по всей видимости

является характеристикой нивального типа седиментагенеза Горного Алтая. Концентрация ртути (мкг/г) в донных отложениях озер в зависимости от класса представлены в Таблице 1. В озерах, для которых характерен с нивальный тип седиментогенеза, в целом, характерны те же значения концентраций ртути что и для озер, для которых характерен с гумидный и аридный тип седиментогенеза.

Максимальные наблюдаемые значения концентраций ртути (0.2 мкг/г) наблюдаются для о.Бирюзовое, которое в одиночку формирует выборку донных отложений с смешенным классом донных отложений. Отличные высокие значения концентраций ртути в донных отложениях данного озера объясняется близостью Акташского ртутного месторождения.

Изучение вертикального распределения ртути показало, что для донных отложений озер всех типов седиментогенеза характерно увеличение концентраций к верху разреза, где достигаются максимальные значения (Рис. 1).

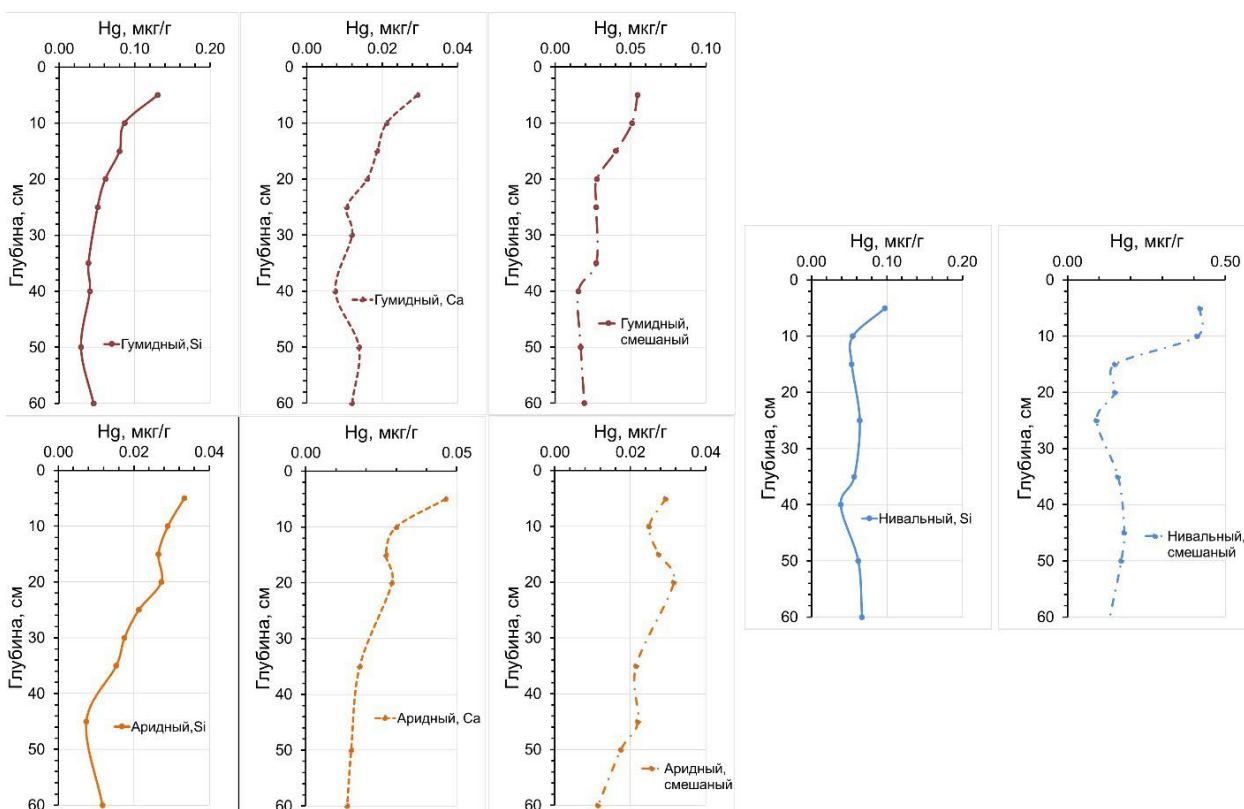


Рис.1. Вертикальные распределения концентраций ртути в усредненных колонках донных отложений для озера относящихся к разным типам седиментогенеза.

Атмосферное осаждение в виде осадков, являются основными природными источниками ртути для озер, на водосборной территории которых нет выходов ртути содержащих пород (Louis et al., 2016.). Данный факт в полной мере подтверждается схожим характером распределения ртути в донных отложениях озер относящимся к разным ландшафтным зонам юга Западной Сибири. Характерное увеличение концентраций ртути в верхней части донных отложений озер объясняется увеличением выбросов ртути в атмосферу в современное время (Streets et al., 2017)

4. Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Содержание ртути для донных отложений озер, отобранных в среднегорье и высокогорье Горного Алтая в среднем равно 0.06 мкг/г, что близко к значениям для озер других ландшафтных зон юга Западной Сибири. Различий в значениях концентрации ртути для озер высокогорья и среднегорья не установлены. В независимости от типа седиментогенеза в озерах разных ландшафтных зон юга Западной Сибири вдоль меридионального трансекта распределение ртути по разрезу характеризуется увеличением значений в верх по разрезу, что объясняется увеличением потока ртути из атмосферы в современное время.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Gavshin V.M., Kutsenogiy K.P., Strakhovenko V.D. et al. 1999. Assessment of changes in the geochemical background in the landscapes of Western Siberia under the influence of technogenic loads throughout the 20th century (No. 97-05-65235). Russian Foundation for Basic Research. (in Russian)
- Louis St. V., Graydon J., Mitchell C. et al. 2016. Mercury fate and methylation in terrestrial upland and wetland environments In Canada. Mercury Science Assessment.
- Malikova I.N., Strakhovenko V.D. 2017. Microelements in bottom sediments of lakes in Siberia landscape zones. In water and ecological problems of Siberia and Central Asia.132-141. (in Russian)
- Strakhovenko V.D., Malov V.I., Malov G.I. et al. 2022. Spatio-temporal distribution of gross mercury contents in the bottom sediments of small lakes of the taiga zone. *Limnology and Freshwater Biology*. 1262-1265. DOI [10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262)
- Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N. et al. 2010. The regularities of distribution of radionuclides and rare-earth elements in bottom sediments of Siberian lakes. *Russian Geology and Geophysics* 51(11): 1167-1178.
- Streets D.G., Horowitz H.M., Jacob D.J. et al. 2017. Total mercury released to the environment by human activities. *Environmental science & technology* 51(11): 5969-5977. DOI [10.1021/acs.est.7b00451](https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00451)
- WHO. 2017. Ten chemicals of major health concern. Retrieved from www.who.int/ipcs/assessment/public_health/chemicals_phc/en/index.html

Reconstruction of climate in the North-East of Russia using dendrochronological methods



Kolmogorov A.I.^{1,3*}, Kirdyanov A.V.^{2,3}, Nikolaev A.N.¹, Arzac A.³

¹North-Eastern Federal University, Belinskiy st. 58, Yakutsk, 677000, Russia

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RASc, Akademgorodok 50, 28 build, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³Siberian Federal University, pr. Svobodnyy 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of a dendroclimatic analysis of larch trees growing in the Arctic regions of Northeast Russia. A comparative analysis of dendrochronological parameters and climatic response of generalized regional chronologies was carried out. The results of dendroclimatic analysis showed that different areas have their own characteristics of the radial growth reaction.

Keywords: radial growth, Arctic, temperature, larch, reconstruction

For citation: Kolmogorov A.I., Kirdyanov A.V., Nikolaev A.N., Arzac A. Reconstruction of climate in the North-East of Russia using dendrochronological methods // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 406-409. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-406

1. Introduction

The study of the response of woody vegetation in the Arctic regions of Russia is currently receiving increased attention due to an increase in air temperature, which in these regions is several times higher than the global average (Rantanen et al., 2022). Warming in the boreal forest zone expands the range of woody vegetation to the north and contributes to shifts in the beginning and duration of the growing season, leading to the degradation of permafrost. Ecosystems located in Arctic regions are the most sensitive to changing climatic conditions, and assessing the rate of these changes in space is an important task.

It is known that the growth and development of forest ecosystems along the circumpolar belt at high latitudes mainly depends on air temperature during the growing season (Schweingruber and Briffa, 1996; Vaganov et al., 1996). The collection of dendrochronological material for dendroclimatic studies was carried out in extreme conditions for tree growth, where the temperature signal in the chronologies is the strongest, which usually makes it possible to obtain similar chronologies within each dendroclimatic region.

The purpose of the work is to obtain representative generalized chronologies for the width of larch tree rings in the northeast of Russia, spatial analysis of the climatic response of radial tree growth and assessment of the potential of the resulting tree-ring chronologies for climate reconstructions.

2. Materials

The study area is limited from the west by the eastern tip of the Taimyr Peninsula and reaches the village of Chersky, Nizhnekolymsky ulus, Republic of Sakha (Yakutia). The transect under study is 2100 km long, located between 72–68 latitudes and 101 – 161 longitudes. The study materials were collected between 2012 and 2021, at 23 sites. For dendroclimatic analysis, the period from 1960 to 2012 was used. The choice is related to the duration of the obtained chronologies, as well as the quality of climate data for the Khatanga, Deputatsky, Kyusyur, Yubileiny, Chokurdakh and Chersky meteorological stations.

3. Result and Discussion

To perform regionalization and comparison of sites, a correlation analysis was carried out between data from all analyzed habitats. Based on the closeness of correlations, the areas were divided into 5 separate groups according to their territory - Taimyr group (TY), Lena and Omoloy river basin area (LO), Ust-Yana group (UY), Indigirka river basin area (IND), basin area Kolyma River (CH). It is shown that each of the dendroclimatic regions is characterized by its own characteristics of the response of the radial growth of trees to the influence of climatic factors. Thus, within TY, the radial increase shows a significant positive correlation with the temperature of June and July, while in areas

*Corresponding author.

E-mail address: ai.kolmogorov@s-vfu.ru (A.I. Kolmogorov)

Received: June 15, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



on the territory of Yakutia only in June.

Calculation of moving correlation coefficients between tree-ring width chronologies and climate data over a 25-year window showed that the response of radial growth to air temperature and precipitation during the growing season varies over time. For the Taimyr group of sites, a gradual increase in the connection with air temperature has been observed in recent decades. An increase in the negative impact of atmospheric precipitation in June was also recorded to significant values ($p < 0.05$) starting from the 1975-1999 period. For the LO region, there is a decrease in the relationship with air temperature in June and an increase to significant values ($p < 0.05$) in May air temperature starting from 1970-1994. For the UY group, the influence of air temperature in June at the end of the studied period decreases, and the negative influence of precipitation in this area increases significantly ($p < 0.05$) for June from 1979-2003, and for May from the period 1977-2001. For the IND region, the influence of June air temperature decreases towards the end of the study period, and the negative influence of precipitation in May increases from 1967-1991. For the Kolyma group of CH sites, a significant ($p < 0.05$) influence of air temperature is observed in June from 1986-2011, as well as in August for certain periods.

4. Conclusions

This work shows the promise of dendroclimatic and dendroecological studies in the northeast of Russia,

aimed at understanding the characteristics of the growth dynamics of woody plants for various habitats in a changing climate.

Acknowledgements

The work was supported by the Ministry of Science and Education of the Russian Federation [FSRG-2020-0014] and [FSRG-2023-0027]

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications earth & environment* 3(168). DOI: [10.1038/s43247-022-00498-3](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3)
- Schweingruber F.H., Briffa K.R. 1996. Tree-Ring Density Networks for Climate Reconstruction. In: Jones, P.D., Bradley, R.S., Jouzel, J. (Eds.) *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. NATO ASI Series, vol 41. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-642-61113-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61113-1_3)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. 1996. *Dendroclimatic studies in the Ural-Siberian Subarctic*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.)

Реконструкция климата на Северо-Востоке России дендрохронологическими методами

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYКолмогоров А.И.^{1,3*}, Кирдянов А.В.^{2,3}, Николаев А.Н.¹, Арсак А.³¹ Северо-Восточный Федеральный Университет имени М.К. Аммосова, Беллинского 58, Якутск, 677000, Россия² Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок 50, стр. 28, Красноярск, 660036, Россия³ Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе предоставлены результаты дендроклиматического анализа деревьев лиственницы, произрастающие в Арктических регионах Северо-востока России. Проведен сравнительный анализ дендрохронологических параметров и климатического отклика обобщенных региональных хронологий. Результаты дендроклиматического анализа показали, что в разных районах характерны свои особенности реакции радиального прироста.

Ключевые слова: радиальный прирост, Арктика, температура, лиственница, реконструкция

Для цитирования: Колмогоров А.И., Кирдянов А.В., Николаев А.Н., Арсак А. Реконструкция климата на Северо-Востоке России дендрохронологическими методами // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 406-409. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-406

1. Введение

Изучению реакции древесной растительности в Арктических регионах России в настоящее время уделяется повышенное внимание в связи с увеличением температуры воздуха, которое в данных регионах в разы превышает средние глобальные значения (Rantanen et al., 2022). Потепление в зоне бореальных лесов расширению ареалов древесной растительности на север и способствуют сдвигам в начале и длительности вегетационного периода, ведет к деградации вечной мерзлоты. Экосистемы, расположенные в арктических районах, являются наиболее чувствительными к изменению климатических условий, и оценка скорости этих изменений в пространстве является важной задачей.

Известно, что рост и развития лесных экосистем вдоль циркумполярного пояса в высоких широтах в основном зависит от температуры воздуха во время вегетационного периода (Schweingruber and Briffa, 1996; Ваганов и др., 1996). Сбор дендрохронологического материала для дендроклиматических исследований проводился в экстремальных для роста деревьев условиях, где температурный сигнал в хронологиях наиболее сильный, что обычно позволяет получить схожие хронологии в пределах каждого дендроклиматического района.

Цель работы является получение репрезента-

тивных обобщенных хронологий по ширине древесных колец лиственницы на северо-востоке России, пространственный анализ климатического отклика радиального прироста деревьев и оценка потенциала полученных древесно-кольцевых хронологий для реконструкций климата.

2. Материалы и методы

Район исследования с запада ограничен восточной оконечностью п-ва Таймыр и доходит до п. Черский Нижнеколымского улуса, Республики Саха (Якутия). Изучаемый трансект протяженностью 2100 км. располагается между 72-68 широтами и 101 – 161 долготой. Материалы исследования были собраны в период с 2012 по 2021 гг. на 23 участках. Для дендроклиматического анализа использовался период с 1960 по 2012 года. Выбор связан с длительностью полученных хронологий, а также качеством климатических данных для метеорологических станций Хатанга, Депутатский, Кюсюр, Юбилейный, Чокурдах и Черский.

3. Результаты и обсуждения

Для выполнения районирования и сравнения участков, был проведен корреляционный анализ между данными из всех анализируемых местообит-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ai.kolmogorov@s-vfu.ru (А.И. Колмогоров)

Поступила: 15 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



таний. Исходя из тесноты корреляционных связей участки были разделены на 5 отдельных групп по территории принадлежности – Таймырская группа (TY), район бассейна рек Лена и Омолуй (LO), Усть-Янская группа (UY), район бассейна реки Индигирка (IND), район бассейна реки Колыма (CH). Показано, что для каждого из дендроклиматических районов характерны свои особенности реакции радиального прироста деревьев на влияние климатических факторов. Так, в пределах TY радиальный прирост показывает значимую положительную корреляционную связь с температурой июня и июля, тогда как на участках на территории Якутии только июня.

Расчет скользящих коэффициентов корреляции между хронологиями ширины древесных колец и климатическими данными с окном в 25 лет показал, что отклик радиального прироста на температуру воздуха и выпавших осадков за вегетационный период меняется по времени. Для Таймырской группы участков наблюдается постепенное увеличение связи с температурой воздуха в последние десятилетия. Также зафиксировано увеличение негативное влияние атмосферных осадков июня до значимых значений ($p < 0.05$) начиная с 1975-1999 периода. Для региона LO наблюдается уменьшения связи с температурой воздуха июня и увеличения до значимых значений ($p < 0.05$) температура воздуха мая начиная с 1970-1994 гг. Для группы UY влияние температуры воздуха июня в конце изучаемого периода уменьшается, а негативное влияние выпавших осадков в этом районе значимо ($p < 0.05$) увеличивается для июня с 1979-2003 гг., и для мая с периода 1977-2001 гг. Для района IND влияние температуры воздуха июня уменьшается к концу изучаемого периода, и увеличивается негативное влияние выпавших осадков в мае начиная с 1967-1991 гг. Для колымской группы участков CH наблюдается значимое ($p < 0.05$) влияние температуры воздуха в июне с 1986-2011 гг., а также в августе для отдельных периодов.

4. Выводы

Данная работа показывает перспективность проведения дендроклиматических и дендроэкологических исследований на северо-востоке России, нацеленных на понимание особенностей динамики роста древесных растений для различных местообитаний в условиях меняющегося климата.

Благодарности

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации [FSRG-2020-0014] и [FSRG-2023-0027]

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications earth & environment* 3(168). DOI: [10.1038/s43247-022-00498-3](https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3)
- Schweingruber F.H., Briffa K.R. 1996. Tree-Ring Density Networks for Climate Reconstruction. In: Jones, P.D., Bradley, R.S., Jouzel, J. (eds) *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. NATO ASI Series, vol 41. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-642-61113-1_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61113-1_3)
- Vaganov E.A., Shiyatov S.G., Mazepa V.S. 1996. *Dendroclimatichekie issledovaniya v Urale-Sibirskoy Subarctiki*. Novosibirsk: Nauka. (In Russ.)

Spatiotemporal features of the distribution of Cd, Hg, Pb in bottom sediments of small lakes in the south of Western Siberia formed in various types of sedimentogenesis

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Malov G.I.*, Strahovenko V.D., Ovdina E.A., Malov V.I.

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ave. Academician Koptyug, 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The paper presents data on the weight contents of Cd, Hg, Pb in bottom sediments of small lakes in the south of Western Siberia. For sapropel deposits of natural moisture of different types and classes, formed under conditions of all types of sedimentogenesis (humid, arid and nival), the average calculated volumetric contents of Cd, Hg, Pb: 0.05 g/m³, 0.01 g/m³, 3 g/m³, respectively. It was revealed that their volumetric quantity per 1 m³ in sapropel deposits of natural humidity of small lakes does not increase during the Holocene period, varying from lake to lake regardless of the type of sedimentogenesis and composition of bottom sediment.

Keywords: bottom sedimentation, heavy metals, geochemistry

For citation: Malov G.I., Strahovenko V.D., Ovdina E.A., Malov V.I. Spatiotemporal features of the distribution of Cd, Hg, Pb in bottom sediments of small lakes in the south of Western Siberia formed in various types of sedimentogenesis // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 410-415. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-410

1. Introduction

The huge resources of sapropels, the composition of their organic and mineral parts allow us to consider sapropel deposits as a valuable mineral resource, suitable for use in various sectors of the national economy. The traditional use of sapropel is associated with agriculture and medicine (balneology). In this connection, the question of the quality of sapropel raw materials and its harmlessness to humans is urgent. Therefore, an attempt was made to quantitatively assess the increase in the volumetric pool of pollutant elements (Cd, Hg, Pb) in the upper part of the sapropel deposits of the studied lakes.

2. Materials and methods

The object of the study is small lakes in the south of western Siberia. The lakes are located in the south-eastern part of the West Siberian platform bordering the Altai-Sayan folded region, within the Ob-Irtysh interfluvium, and some of the lakes are located on the territory of the Altai Mountains (Ukok plateau, Ulagan valley). A total of 81 lakes were studied, belonging to different landscape zones: Subtaiga West Siberian landscape - 16

lakes, Forest-steppe West Siberian landscape - 30 lakes, Typical West Siberian steppe landscape - 11 lakes, Mid-mountain belt of larch and cedar-larch forests - 4 lakes, High mountain goltsy belt - 7 lakes, extrazonal landscapes (ribbon forests) – 13 lakes (National..., 2007).

The choice of model lakes was determined by the desire to cover all classes of sapropels (classification of V.I. Korde with modifications by V.D. Strakhovenko) for all types of sedimentogenesis characteristic of the landscape zones under study.

Sampling is carried out with a continuous core to the entire depth of bottom sediments using a cylindrical sampler with a vacuum shutter designed by NPO Typhoon (d - 82 mm and L - 120 cm).

Analytical work was carried out at the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk, Russia.

To determine the macro- and microelement composition of the samples, the atomic absorption method and mass spectrometry were used. The morphology, mineral, phase and chemical composition of bottom sediments were analyzed using a scanning electron microscope and X-ray diffractometry. The activities of ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs are determined according to gamma

*Corresponding author.

E-mail address: malovgi@igm.nsc.ru (G.I. Malov)

Received: June 07, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



spectrometry data. Sedimentation rates are estimated by radiometric dating methods using atmospheric ^{210}Pb under a constant flux model (CRS) verified by ^{137}Cs activity peaks across marker horizons.

3. Results and discussion

Previously, a study of the vertical and lateral distribution of microelements in the bottom sediments of the studied lakes showed an increase in concentrations along the section of sapropel deposits towards the “bottom sediment-water” interface of Cd, Hg, Pb.

The global approach to studying the quality of sapropel raw materials involves assessing the concentrations of pollutant elements per dry matter, but the accounting of reserves, the extraction of sapropel and its use is carried out in its natural form (native sapropel), with a wide range of humidity and density. As a result, there is a need for weight and/or volumetric accounting of pollutant elements.

To carry out calculations in each model lake (41 lakes), the section of bottom sediments is divided (according to dating data) into two parts: the upper one - the last 100 years (as the time period with the maximum anthropogenic input) and the lower one - the period of 100-300 years.

Calculation of the volumetric number of potential pollutants in native sapropel were produced according to the formula:

$$M = \rho_{\text{sk.zal}} \cdot V \cdot K, \quad (1)$$

where: M is the mass of the element in the deposit, t ; $\rho_{\text{sk.zal}}$ – skeletal density of sapropel deposit (dry matter content per unit volume of deposit), t/m^3 ; V – volume of sapropel, m^3 ; K – element concentration in dry sapropel sample, g/t .

For standardization and ease of calculation, the volume of sapropel was taken as $1 m^3$. The concentration of the element in a dry sapropel sample was obtained from analytical studies as the average value of all measurements. The density of the sapropel deposit skeleton is a calculated value and is calculated using the formula:

$$\rho_{\text{sk.zal}} = \frac{\rho_t \cdot (1 - \omega)}{\omega \cdot (\rho_t - 1) + 1}, \quad (2)$$

where:

ω – relative humidity of sapropel, %

ρ_t – density of the solid phase of sapropel, t/m^3

Relative humidity was taken according to analytical studies as the average value of all measurements for each part of the section; the density of the solid phase of sapropel is a value directly proportional to the content of organic matter in the sample; for sapropels it varies from 1.4 to 2.7 t/m^3 . The dependence has been studied by many scientists, and a number of formulas for calculations have been proposed; in this work, the

formula of V.A. Filin is used. (Filin, 1988):

$$\rho_t = 2.58 - 0.016 \cdot I, \quad (3)$$

where, I is the content of organic matter in the sample, obtained from the results of analytical studies.

The main indicators that influence the weight content of elements of potential pollutants are: the concentration of the calculated element in the sample, humidity and ash content. In general, the content of potential pollutant elements in the upper part of the section is higher than in the lower part. And changes in humidity and ash content fully correspond to the ideas about temporary transformations in bottom sediments of lakes, namely: compaction of sediment over time, destruction of organic matter, formation of authigenic minerals, etc. Average characteristics of the upper and lower parts of the sections (Humidity - 82% and 69% ; ash content – 59% and 64%, respectively). Average calculated weight contents of elements - potential pollutants in bottom sediments: Cd - 0.05g/ m^3 , Hg - 0.01g/ m^3 , Pb – 3 g/ m^3 .

A comparison was made of the mass content of Cd, Hg, Pb for different types and classes of sapropels. For all types of sapropels, the volumetric weight of the studied elements in the lower part of the sections is higher, and this is associated with higher density and ash content, and as a consequence, higher concentration of elements per volume of $1 m^3$. It should also be noted that there is a significant difference in the mass content of Cd, Hg, Pb in Ca type sapropel. In the studied lakes, authigenic carbonate formation is widespread, in which all other sapropel matter (organic, mineral) is diluted.

A comparative analysis of the weight content of elements (Cd, Hg, Pb) was also carried out for bottom sediments of lakes located in different types of sedimentogenesis. For all types of sedimentogenesis, the weight content of the studied elements in the upper parts of the section is less than in the lower parts. But it is worth noting that under the conditions of each type of sedimentogenesis there are lakes for which the weight content of the studied elements in the upper part of the bottom sediment section is higher than in the lower (Lake Yakovo - humid type of sedimentogenesis, Lake Tanatar 6 - arid type of sedimentogenesis, Lake Horseshoe – nival type of sedimentogenesis).

To assess the prospects of the studied lakes as sapropel deposits, the quality of sapropel was assessed for compliance with the requirements of GOST R 54000-2010. The sapropels of all the studied lakes correspond in all respects to GOST R 54000-2010. According to the content of heavy metals, sapropel belongs to the first class of suitability. “Sapropels of the first class of suitability are used for all types of agricultural crops, in horticulture, floriculture, forestry, for the reclamation of soils, dumps, improvement and landscaping of urban, including recreational, territories in doses recommended taking into account the type of crop, the fertility of each individual fields” (GOST R 54000-2010). From which we can conclude that, despite the

general global increase in the flow of Cd, Hg, Pb into the environment, no deterioration in the quality of sapropel raw materials has been detected..

4. Conclusions

The temporary change in the weight and/or volume pool of pollutant elements (Cd, Hg, Pb) in the sections of sapropel deposits of the studied lakes was quantitatively assessed, and the quality of sapropel raw materials was assessed in accordance with GOST R 54000-2010. According to the content of heavy metals, sapropel belongs to the first class of suitability. Average calculated weight contents of elements - potential pollutants in bottom sediments: Cd - 0.05 ± 0.05 g/m³, Hg - 0.01 ± 0.01 g/m³, Pb - 3 ± 2.7 g/m³. For sapropel deposits of different types and classes, formed under conditions of all types of sedimentogenesis (humid, arid and nival), the weight content of the studied elements in the upper parts of the section (last 100 years) is less than in the lower ones. This means that, given the general global trends of increasing concentrations of heavy metals in the environment, the quality of sapropel raw materials has not deteriorated.

Acknowledgements

The study was carried out at the expense of a grant Russian Science Foundation № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Conflict interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Filin V.A. 1988. Express method for determining the density of sapropel. Peat industry 2.
- GOST R 54000-2010. 2011. Organic fertilizers. Sapropels. General technical conditions. Moscow: Standartinform.
- National Atlas of Russia: In 4 volumes. 2007. In: Dumnov A. D. (Ed.). Moscow: PMA "Cartography" (in Russian)

Пространственно-временные особенности распределения Cd, Hg, Pb в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири, формирующихся в различных типах седиментогенеза

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Малов Г.И.*, Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов В.И.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения РАН, пр-т Академика Коптюга 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены данные о весовых содержаниях Cd, Hg, Pb в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири. Для сапропелевых отложений естественной влажности разных типов и классов, формирующихся в условиях всех типов седиментогенеза (гумидный, аридный и нивальный), средние расчётные объёмные содержания Cd, Hg, Pb: 0.05 г/м³, 0.01 г/м³, 3 г/м³, соответственно. Выявлено, что объёмное количество их на 1 м³ в сапропелевых отложениях естественной влажности малых озёр не возрастает в период голоцена, варьируя от озера к озеру независимо от типа седиментогенеза и состава донного осадка.

Ключевые слова: донные отложения, тяжёлые металлы, геохимия

Для цитирования: Малов Г.И., Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов В.И. Пространственно-временные особенности распределения Cd, Hg, Pb в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири, формирующихся в различных типах седиментогенеза // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 410-415. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-410

1. Введение

Огромные ресурсы сапропелей, состав их органической и минеральной частей позволяют считать сапропелевые отложения ценным полезным ископаемым, пригодным для использования в различных отраслях народного хозяйства. Традиционное использование сапропеля связано с сельским хозяйством и медициной (бальнеологией). В связи с чем остро стоит вопрос об качестве сапропелевого сырья и его безвредности для человека. Поэтому сделана попытка количественно оценить увеличение объёмного пула элементов-поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней части сапропелевых залежах изученных озёр.

2. Материалы и методы

Объектом исследования являются малые озера юга западной Сибири. Озера расположены в юго-восточной части Западно-Сибирской платформы граничащей с Алтае-Саянской складчатой областью, в пределах Обь-Иртышского междуречья, также часть озёр расположены на территории Горного Алтая (плато Укок, Улаганская долина). Всего исследо-

вано 81 озер, относящих к разным ландшафтным зонам: Подтаёжный западносибирский ландшафт – 16 озёр, Лесостепной западносибирский ландшафт – 30 озёр, Степной типичный западносибирский ландшафт – 11 озёр, Среднегорный пояс лиственных и кедрово-лиственных лесов – 4 озера, Высокогорный гольцовый пояс – 7 озёр, экстразональные ландшафты (ленточные боры) – 13 озёр (Национальный ..., 2007).

Выбор модельных озёр обусловлен желанием охватить все классов сапропелей (классификация Кордэ В.И. с доработками Страховенко В.Д.) для всех типов седиментогенеза, характерных для исследуемых ландшафтных зон.

Пробоотбор производится непрерывным керном на всю глубину донных отложений при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (d - 82 мм и L - 120 см).

Аналитическая работа проводилась в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия.

Для определения макро- и микроэлементного состава проб использовался атомно-абсорбционный

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: malovgi@igm.nsc.ru (Г.И. Малов)

Поступила: 07 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



метод и масс-спектрометрия. Морфология, минеральный, фазовый и химический состав донных отложений анализировались при помощи сканирующего электронного микроскопа и методом рентгеновской дифрактометрии. Активности ^{210}Pb и ^{137}Cs определяется по данным гамма спектрометрии. Скорости осадконакопления оцениваются методами радиометрического датирования с использованием атмосферного ^{210}Pb по модели постоянного потока (CRS) с проверкой пиками активности ^{137}Cs по маркирующим горизонтам.

3. Результаты и обсуждение

Ранее изучение вертикального и латерального распределения микроэлементов в донных отложениях изученных озёр, показало увеличение концентраций по разрезу сапропелевых залежей к границе раздела сред «донный осадок-вода» Cd, Hg, Pb.

Мировой подход в изучении качества сапропелевого сырья подразумевает оценку концентраций элементов поллютантов на сухое вещество, но сам учёт запасов, добыча сапропеля и его использование производится в естественном виде (нативный сапропель), с широким диапазоном влажности и плотности. В следствии чего возникает необходимость весового и/или объемного учёта элементов поллютантов.

Для проведения расчётов в каждом модельном озере (41 озеро) разрез донных отложений разделен (по данным датирования) на две части: верхняя – последние 100 лет (как промежуток времени с максимальным антропогенным поступлением) и нижняя – промежуток 100-300 лет.

Расчёт объемного количества потенциальных поллютантов в нативном сапропеле производился по формуле

$$M = \rho_{\text{ск.звл}} \cdot V \cdot K, \quad (1)$$

где: M - масса элемента в залежи, т; $\rho_{\text{ск.звл}}$ - плотность скелета сапропелевой залежи (содержание сухого вещества в ед. объема залежи), т/м³; V - объем сапропеля, м³; K - концентрация элемента в сухой пробе сапропеля, г/т.

Для стандартизации и удобства расчёта объем сапропеля принимался за 1 м³. Концентрация элемента в сухой пробе сапропеля получена по данным аналитических исследований, как средняя величина всех измерений. Плотность скелета сапропелевой залежи является расчётной величиной и рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{ск.звл}} = \frac{\rho_t \cdot (1 - \omega)}{\omega \cdot (\rho_t - 1) + 1}, \quad (2)$$

где:

ω - относительная влажность сапропеля, %

ρ_t - плотность твёрдой фазы сапропеля, т/м³

Относительная влажность бралась по данным аналитических исследований, как средняя величина всех измерений, для каждой части разреза,

плотность твёрдой фазы сапропеля величина прямо пропорционально зависящая от содержания органического вещества в пробе, для сапропелей она изменяется от 1,4 до 2,7 т м³. Зависимость исследована многими учёными, и предложен ряд формул для расчётов, в данной работе используется формула Филина В.А. (Филин, 1988):

$$\rho_t = 2.58 - 0.016 \cdot I, \quad (3)$$

где, I - содержание органического вещества в пробе, полученное по результатам аналитических исследований.

Основными показателями, влияющими на весовое содержание элементов потенциальных поллютантов, являются: концентрация рассчитываемого элемента в пробе, влажность и зольность. В целом содержание элементов потенциальных поллютантов в верхней части разреза выше, чем в нижней. А изменения во влажности и зольности полностью соответствуют представлениям о временных преобразованиях в донных осадках озёр, а именно: уплотнению осадка со временем, деструкция органического вещества, образование аутигенных минералов и др. Средние характеристики верхней и нижней частей разрезов (Влажность - 82% и 69%; зольность - 59% и 64 % соответственно). Средние расчётные весовые содержания элементов - потенциальных поллютантов в донных отложениях: Cd - 0.05 ± 0.05 г/м³, Hg - 0.01 ± 0.01 г/м³, Pb - 3 ± 2.7 г/м³.

Проведено сравнение массового содержания Cd, Hg, Pb, для разных типов и классов сапропелей. Для всех типов сапропелей объемного веса изученных элементов в нижней части разрезов выше, и связано это с большей плотностью и зольностью, и как следствием, большей концентрацией элементов на объем 1 м³. Так же следует отметить значительное отличие в массовом содержании Cd, Hg, Pb в Са типе сапропеля. В Изученных озёрах широко распространённо аутигенное карбонатообразование, при котором, все остальное вещество сапропеля (органическое, минеральное) разубоживается.

Так же проведен сравнительный анализ весового содержания элементов (Cd, Hg, Pb), для донных отложений озёр, расположенных в различных типах седиментогенеза. Для всех типов седиментогенеза, весовое содержание изученных элементов, в верхних частях разреза меньше чем в нижних. Но стоит отметить, что в условиях каждого типа седиментогенеза есть озёра, для которых весовое содержание изученных элементов в верхней части разреза донных отложений выше, чем в нижней (оз. Яково - гумидный тип седиментогенеза, оз. Танатар 6 - аридный тип седиментогенеза, оз. Подкова - нивальный тип седиментогенеза).

Для оценки перспективности исследованных озёр, как месторождений сапропеля, проведена оценка качества сапропеля, на соответствие требованиям ГОСТ Р 54000-2010. Сапропели всех исследованных озёр, по всем параметрам соответствует ГОСТ Р 54000-2010. По содержанию тяжёлых металлов сапропель относится к первому классу пригодности. «Сапропели первого класса пригодности»

сти применяются под все виды сельскохозяйственных культур, в садоводстве, цветоводстве, лесном хозяйстве, при рекультивации почв, отвалов, благоустройстве и озеленении городских, в том числе и рекреационных, территорий в дозах, рекомендованных с учетом вида культуры, плодородия каждого отдельного поля» (ГОСТ Р 54000-2010). Из чего можно сделать вывод, что, несмотря на общее мировое увеличение поступления Cd, Hg, Pb в окружающую среду, ухудшения качества сапропелевого сырья не обнаружено.

4. Заключение

Количественно оценено временное изменение весового и/или объемного пула элементов-поллютантов (Cd, Hg, Pb) в разрезах сапропелевых залежах изученных озер, и проведена оценка качества сапропелевого сырья по ГОСТ Р 54000-2010. По содержанию тяжёлых металлов сапропель относится к первому классу пригодности. Средние расчётные весовые содержания элементов - потенциальных поллютантов в донных отложениях: Cd – 0.05 ± 0.05 г/м³, Hg – 0.01 ± 0.01 г/м³, Pb - 3 ± 2.7 г/м³. Для сапропелевых отложений, разных типов и классов, формирующихся в условиях всех типов седиментогенеза (гумидный, аридный и нивальный), весовое содержание изученных элементов, в верхних частях

разреза (последние 100 лет) меньше чем в нижних. Из-чего следует, что при общих мировых тенденциях увеличения концентраций тяжёлых металлов в окружающей среде, качество сапропелевого сырья не ухудшилось.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- ГОСТ Р 54000-2010. 2011. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ.
- Национальный атлас России: В 4-х томах. 2007. Думнов А.Д.. Москва: ПКО «Картография».
- Филин В.А. 1988. Экспресс-метод определения плотности сапропеля. Торфяная промышленность. 2.

Organochlorine compounds in the bottom sediments of the meromictic Mogilnoe Lake (Kildin Island, Russia)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Kolpakova E.S.*, Velyamidova A.V., Koroleva T.A.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Av., 20, Arkhangelsk, 163020, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of a study of the behavior of organochlorine compounds (chlorinated benzenes and phenols) in the bottom sediments of Mogilnoe Lake (Kildin Island, Barents Sea). Mogilnoe Lake is a meromictic water reservoir located in the high latitudes of the Russian Arctic. A unique feature of the lake is its underground connection with the sea, which makes it similar to tropical anchialine lakes. Lake sediment samples were taken at three deep-water stations during complex expedition work in June 2019 by employees of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk). Organochlorine compounds were extracted from air-dried samples of bottom sediments using accelerated flow-through solvent extraction with a hot mixture of organic solvents. Determination of the concentrations of chlorinated benzenes was carried out according to RD 52.24.417-2011 (RF), and the concentrations of chlorinated phenols and their derivatives – in accordance with the ISO 14154:2005. Quantification and identification of individual organochlorine compounds were carried out by capillary gas chromatography with electron capture detection. The presence of organochlorine compounds in sediments of the meromictic Mogilnoe Lake has been established. Concentrations of persistent organochlorine pollutants were assessed as high. Most likely, the component composition of organochlorine compounds and their detected levels (primarily pollutants) in the bottom sediments of the lake are due to the influence of various local anthropogenic sources, as well as atmospheric long-range transport from low/moderate latitudes and nearby regions.

Keywords: meromictic lake, bottom sediments, organochlorine compounds

For citation: Kolpakova E.S., Velyamidova A.V., Koroleva T.A. Organochlorine compounds in the bottom sediments of the meromictic Mogilnoe Lake (Kildin Island, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 416-420. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-416

1. Introduction

Recently, the environmental impact on the Arctic and Subarctic regions has been constantly increasing: oil and gas production on the shelf of the Arctic Ocean is expanding; traffic along the Northern Sea Route is intensifying, etc. In this regard, significant attention must be paid to the problem of pollution of the natural ecosystems of these regions, incl. pollution by persistent organic pollutants (POPs) entering the environment not only as a result of long-range transport from remote anthropogenic sources, but also from local emission sources.

As a result of transboundary transport to high latitude regions, such compounds with resistance to degradation and ability to bioaccumulation can accumulate in terrestrial ecosystems, snow cover, ice, and

living organisms. In the cold climate of the northern territories, the so-called “conservation” and biomagnification of POPs occurs. When pollutants enter a water reservoir, they can accumulate in aquatic organisms and can be transmitted through the food chain, as well as be absorbed by particles of organic matter and end up in bottom sediments.

2. Materials and methods

This paper presents the results of a study of Mogilnoe Lake, located in the southeastern tip of Kildin Island (near the coast of the Kola Peninsula, in the Barents Sea). This small arctic lake is the remnant of a sea bay, which was separated from the sea by a rocky barrier approximately 1500 years ago, but still retains an underground connection with the sea (Strelkov et al.,

*Corresponding author.

E-mail address: kolpelen@yandex.ru (E.S. Kolpakova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2019). Mogilnoe Lake has got a meromictic structure of the water column – a fresh upper layer, a salty marine layer in the middle, and a bottom layer contaminated with toxic hydrogen sulfide. “In contrast to sea bays and freshwater lakes, a meromictic lake is never completely mixed. Wind mixing covers only the surface water layer, and it is desalinated. The deeper water is salty. The lack of wind mixing, “refreshing” the bottom zone, led to stagnation, as a result of which the process of bacterial sulfate reduction (the reduction of sulfur, which is contained in seawater sulfates, to hydrogen sulfide) was activated” (Strelkov et al., 2019). High concentrations of hydrogen sulfide (more than 200 mg/l) were detected in the lake water (Losyuk et al., 2019).

In June 2019, employees of the Laboratory of Ecoanalytical Research of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk) took part in expeditionary complex work under the Russian Geographical Society project “Lullaby of the Cod Lake. Documentation of the ecosystem of Mogilnoe Lake (Kildin Island, Barents Sea)” (Strelkov et al., 2019). For this study, bottom sediments were collected at three deepwater stations. The max length of sediment cores reached 25 cm, with a sampling interval of 5 cm.

Extraction of individual organochlorine compounds (OCs), incl. POPs, from air-dried samples of bottom sediments were carried out via accelerated flow-through solvent extraction with a hot mixture of organic solvents (hexane/acetone). The resulting extract was treated with a solution of sodium hydroxide to separate acidic and neutral compounds. The total content of acidic compounds (chlorophenolic compounds, CPs) was determined by summing their concentrations in easily and difficultly extracted fractions. The CPs isolated from each fraction were derivatized with acetic anhydride in a weakly alkaline medium in accordance with ISO 14154:2005. The organic phase containing neutral compounds (including penta- and hexachlorobenzenes) was purified from accompanying organic impurities according to RD 52.24.417-2011 (Russia). Analytical quantification and identification of individual OCs were carried out by capillary gas chromatography with electron capture detection (Crystal 5000 GC, Chromatec, Russia) with programming the temperatures of column thermostats. The lower detection limit of individual OCs is 0.0001 µg/g of air-dry sediment.

3. Results and discussion

According to the results of the study, hexachlorobenzene (HCB), pentachlorobenzene (PeCB), and pentachlorophenol (PCP) were found in all bottom sediments sampled in different parts of Mogilnoe Lake. Concentrations of HCB in sediments ranged from 30.8

to 346.5 ng/g, PeCB from 2.2 to 39.6 ng/g, and PCP from 3 to 89.7 ng/g. The detected concentrations of these POPs can be considered as high. Along with PCP, other CPs were found in lake sediments. The dominant compounds among the CPs were those formed and coming from sources associated with combustion and incineration processes of various organic raw materials and other materials (PCP, 2,3,4,6-tetrachlorophenol, 2,4,6-trichlorophenol, 2,4-dichlorophenol, and 4-chlorophenol) (Briois et al., 2006). In addition, chlorophenol metabolites (mono- and dichlorophenols), the formation of which is caused by natural enzymatic processes, were identified in lake sediments. Although the proportion of these compounds in the composition of CPs was significantly lower compared to compounds of technogenic origin.

4. Conclusions

Therefore, the formation of the composition and levels of individual OCs in bottom sediments is a consequence of the low intensity of the degradation processes occurring in the components of the ecosystem of the meromictic Mogilnoe Lake. The high content of hydrogen sulfide in the water column of the lake and low ambient temperatures inhibit the processes of reductive dechlorination of OCs, which leads to their accumulation in bottom sediments. The component composition and detected concentrations of OCs in lake sediments are most likely caused by the supply of these compounds from various local anthropogenic sources, as well as long-range transport from low/temperate latitudes and nearby regions. The determined profile of individual CPs (PCP, 2,3,4,6-TeCP, 2,4,6-TCP, 2,4-DCP, 4-CP) indicated the dominance of combustion and incineration processes among the sources.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Briois C., Gullett B.K., Ryan S.P. et al. 2006. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash. *Organohalogen Compounds* 68: 1209–1212
- Strelkov P., Stogov I., Krasnova E. et al. 2019. Rapid unpredicted changes in the stratification of marine lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea) through the early 21st century. *Polar Research* 38(3394): 1–7. DOI: [10.33265/polar.v38.3394](https://doi.org/10.33265/polar.v38.3394)
- Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Vasilenko A.N. et al. 2019. Progressive hydrogen sulfide contamination of Lake Mogilnoye according to the 2019 expedition. XXIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology “Geology of Seas and Oceans”, pp. 175–178. (in Russian)

Хлорорганические соединения в донных осадках меромиктического озера Могильное (остров Кильдин)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Колпакова Е.С.*, Вельямидова А.В., Королева Т.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, 163020, г. Архангельск, проспект Никольский, 20, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты изучения особенностей поведения хлорорганических соединений (хлорированных бензолов и фенолов) в донных осадках озера Могильное (о. Кильдин, Баренцевом море). Озеро Могильное – морской меромиктический водоем, расположенный в высоких широтах Арктики. Уникальная особенность водоема – его подземная связь с морем, что делает его аналогом тропических анхалиновых озер. Пробы донных осадков отобраны на трех глубоководных станциях в ходе комплексных экспедиционных работ в июне 2019 года сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск). Извлечение хлорорганических соединений из воздушно-сухих проб донных осадков проводили методом ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью органических растворителей. Определение концентраций хлорированных бензолов проводили согласно РД 52.24.417-2011. Определение концентраций хлорированных фенолов и их производных проводили в соответствии со стандартом ISO 14154:2005. Количественное определение и идентификацию хлорорганических соединений проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием. Установлено присутствие хлорорганических соединений в осадках меромиктического озера Могильное. Концентрации стойких хлорорганических загрязнителей оценивались как высокие. Компонентный состав хлорорганических соединений в донных отложениях оз. Могильное наряду с их выявленными уровнями содержания (прежде всего из списка СОЗ), вероятнее всего, обусловлен поступлением этих соединений от различных антропогенных/техногенных источников локального уровня, а также атмосферным переносом из низких/умеренных широт и близлежащих регионов.

Ключевые слова: меромиктическое озеро, донные отложения, хлорорганические соединения

Для цитирования: Колпакова Е.С., Вельямидова А.В., Королева Т.А. Хлорорганические соединения в донных осадках меромиктического озера Могильное (остров Кильдин) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 416-420. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-416

1. Введение

В последнее время техногенная нагрузка на Арктику и Субарктику постоянно возрастает: расширяется нефте- и газодобыча на шельфе Северного Ледовитого океана, активизируется транспортный поток по Северному морскому пути и т.д. В этой связи значительное внимание необходимо уделять проблеме загрязнения их экосистем, в т.ч. стойкими органическими загрязнителями (СОЗ), поступающими не только в результате переноса от удаленных антропогенных/техногенных источников, но и от локальных источников их эмиссии в окружающую среду.

В результате трансграничного переноса в высокоширотные регионы такие соединения, обладающие устойчивостью к разложению и способностью к биоаккумуляции, могут накапливаться в экосистемах суши, в снежном покрове, толще льда и живых организмах. В условиях холодного климата северных территорий происходит консервация и биоусиление воздействия СОЗ. При поступлении в водоем загрязнители способны аккумулироваться в гидробионтах и передаваться по пищевой цепи, увеличивая свою концентрацию в каждом последующем звене, а также поглощаться частицами органического вещества и попадать в донные отложения.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: kolpelen@yandex.ru (Е.С. Колпакова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

В данной работе приведены результаты исследования озера Могильное, расположенного в юго-восточной оконечности о. Кильдин, в Баренцевом море вблизи побережья Кольского полуострова. Это арктическое малое озеро является остатком залива, отделившегося от моря около полутора тысяч лет назад каменистой перемычкой, но до сих пор сохраняет подземную связь с морем (Strelkov et al., 2019). Для оз. Могильного характерна меромиктическая структура водной толщи – верхний пресный слой, соленый морской слой посередине и придонный зараженный токсичным сероводородом слой. «В противоположность морским заливам и пресным озерам, меромиктическое озеро никогда не перемешивается целиком. Ветровое перемешивание охватывает лишь самый поверхностный слой воды, и он опреснен. Глубже вода соленая. Отсутствие перемешивания, освежающего придонную зону, привело к застойным явлениям, в результате чего активизировался процесс бактериальной сульфатредукции – восстановления серы, которая содержится в сульфатах морской воды, до сероводорода» (Strelkov et al., 2019). В озере были зафиксированы высокие концентрации сероводорода (более 200 мг/л) (Лосюк и др., 2019).

В июне 2019 года сотрудники лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН принимали участие в экспедиционных комплексных работах на этом водоеме по проекту РГО «Колыбельная трескового озера. Документация экосистемы озера Могильного (о. Кильдин, Баренцево море)» (Strelkov et al., 2019). Для исследования были отобраны донные осадки на трех глубоководных станциях; длина осадочных кернов достигала 25 см, интервал отбора проб составлял 5 см.

Извлечение индивидуальных хлорорганических соединений (ХОС), в т.ч. соединений из списка СОЗ, из воздушно-сухих проб донных осадков проводили методом ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью органических растворителей (гексан:ацетон) Полученный экстракт обрабатывали раствором гидроксида натрия для разделения кислых и нейтральных соединений. Общее содержание соединений кислого характера (хлорфенольных соединений, ХФС) определяли суммированием их концентраций в легко- и трудноэкстрагируемой фракциях. Выделенные из каждой фракции ХФС дериватизировали уксусным ангидридом в слабощелочной среде для получения ацетильных производных в соответствии со стандартом ISO 14154:2005. Органическую фазу, содержащую соединения нейтрального характера (включая гекса- и пентахлорбензолы) очищали от сопутствующих органических примесей согласно РД 52.24.417-2011. Количественное определение и идентификацию ХОС проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием (“Кристалл 5000.1”, СКБ “Хроматэк”; Россия) при программировании температур термостатов колонок. Нижний предел обнаружения индивидуальных ХОС – 0.0001 мкг/г в.с.в.

3. Результаты и обсуждение

По результатам исследования малого оз. Могильное гексахлорбензол (ГХБ), пентахлорбензол (ПеХБ) и пентахлорфенол (ПХФ) обнаружены во всех донных осадках, отобранных в разных частях акватории озера. Концентрации ГХБ в осадках составляли от 30,8 до 346,5 нг/г, ПеХБ – от 2,2 до 39,6 нг/г, ПХФ – от 3 до 89,7 нг/г. Выявленные концентрации стойких хлорорганических загрязнителей можно отнести к очень высоким. Наряду с ПХФ в осадках найдены другие ХФС. Среди ХФС доминировали соединения, образующиеся и поступающие от источников, связанных с процессами сжигания/горения различного органического сырья и материалов (ПХФ, 2,3,4,6-ТеХФ, 2,4,6-ТХФ, 2,4-ДХФ, 4-ХФ) (Briois et al., 2006). Вместе с тем в озерных осадках присутствовали хлорфенольные метаболиты (моно- и дихлорфенолы), образование которых обусловлено естественными энзиматическими процессами, хотя доля их в составе ХФС значительно ниже по сравнению с соединениями техногенного происхождения.

4. Заключение

Таким образом, формирование состава и уровней содержания индивидуальных ХОС является следствием низкой интенсивности процессов деградации, протекающих в компонентах экосистемы меромиктического оз. Могильное. Высокое содержание сероводорода в водной толще озера и низкие температуры тормозят процессы восстановительного дехлорирования ХОС, что приводит к накоплению их в осадках. Компонентный состав ХОС наряду с выявленными уровнями содержания в озерных осадках, вероятнее всего, обусловлены поступлением этих соединений от различных антропогенных/техногенных источников локального уровня, а также переносом из низких/умеренных широт и близлежащих регионов. Найденный профиль индивидуальных ХФС (ПХФ, 2,3,4,6-ТеХФ, 2,4,6-ТХФ, 2,4-ДХФ, 4-ХФ) указывал на доминирование среди источников процессов сжигания/горения различного органического сырья и материалов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Briois C., Gullett B.K., Ryan S.P. et al. 2006. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash. *Organohalogen Compounds* 68: 1209–1212.
- Strelkov P., Stogov I., Krasnova E. et al. 2019. Rapid unpredicted changes in the stratification of marine lake Mogilnoe (Kildin Island, the Barents Sea) through the early 21st century. *Polar Research* 38(3394): 1–7. DOI: [10.33265/polar.v38.3394](https://doi.org/10.33265/polar.v38.3394)

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Василенко А.Н. и др.
2019. Прогрессирующее сероводородное заражение озера
Могильного по данным экспедиции 2019 года. XXIII меж-
дународная научная конференция (Школа) по морской
геологии «Геология морей и океанов», С. 175–178.

Lake evolution and climate change in the South-West Siberia



Maltsev A.E.^{1*}, Krivonogov S.K.^{1,2}, Solotchina E.P.¹, Smolentseva E.N.³

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Academician Koptyug ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

² Korkyt-Ata Kyzylorda University, Aiteke bi 29A, Kyzylorda, 120014, Kazakhstan

³ Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Academician Lavrentiev ave., 8/2, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. A complex of mineralogical and geochemical data from the south of Western Siberia indicates that the middle Holocene warm and dry epoch ended 5.5–4 cal ka BP with the further onset of more humid and cold conditions in the region. Significant changes in the regional climate probably occurred about 3.6–3.1 cal ka BP that is marked by an increase in the content of carbonates in the sediments, and by changes in vegetation. A general trend in the content of Mg in the carbonate fraction of lake sediments clearly shows a variation in water salinity as a response to climate change. There was a cyclical change of periods of drying/humidification of the Holocene climate of southern Western Siberia.

Keywords: Salt lakes, paleoclimate, mineralogical and geochemical indicators, carbonates, Holocene, bottom sediments, Western Siberia

For citation: Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Solotchina E.P., Smolentseva E.N. Lake evolution and climate change in the South-West Siberia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 421-427. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-421

1. Introduction

Complex mineral-geochemical studies of bottom sediments of a number of lakes of the region (Figure 1) showed significant changes in the natural and climatic conditions during the Holocene (Krivonogov et al., 2012a;b; 2023; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020; 2022). These changes are also reflected in lithological, mineralogical, and geochemical features of bottom sediments due to aridization/humidization cycles of the regional climate (Figure 2).

Thus, our data from the brackish-water lakes Bolshie Toroki and Itkul indicate warm and moist climate for the period of 8.7–7.8 and arid conditions 7.8–5.3 cal ka BP. The latter, with a time lag, may probably correspond to the global climate event Bond-4 of 5.9–5.3 ka BP. Our data suggests that climate was cooler but still dry 5.3–3.1 cal ka BP, as evidenced by the rather intense precipitation of authigenic carbonates. Similarly, pollen data from Lake Bolshie Toroki (Zhilich et al., 2017) show the warmest and driest climate between 7.0 and 5.5 cal ka BP and a cooling trend

later. Humidity increases from 3.1 ka BP till 0 BP, but an increase in Ca and carbonates in the last centimeters of the sediments may indicate an increase in aridity at the present stage.

2. Materials and methods

A complex study of Lake Beloye in the north-eastern part of the region (Krivonogov et al., 2012a;b) revealed colder and drier stages 3.4–2.3 and 2.8–1.7 cal ka BP, respectively. The dry stage coincides with the low lake level of 2.6–1.5 cal ka BP. The climate later became warmer and wetter, causing the highest level of the lake to be 1.3–0.2 cal ka BP, with the next decrease occurring today. Sedimentation and the related biogeochemical proxies showed a sharp change of the lake ecosystem from eutrophic to oligotrophic about 3.4 cal ka BP. This could be caused primarily by climate change, which was warmer and wetter up to 3.4 cal ka BP and after that - cooler and drier.

*Corresponding author.

E-mail address: maltsev@igm.nsc.ru (A.E. Maltsev)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and discussion

Biogeochemical and paleontological proxies from Lake Chany also show a climatic change about 4 cal ka BP (Krivonogov et al., 2023). Summer temperatures were relatively low between 3.6 and 2.2 cal ka BP, gradually increasing with a maximum of 0.7–0.4 cal ka BP and further decreasing. Biomarkers identified three colder and wetter episodes: 3.3–2.1, 1.4–1.0 and 0.45–0.15 cal ka BP. The lake was significantly reduced or did not exist in the earlier stages of the Holocene.

Data on the ostracods of Lake Sargul showed two stages of its evolution during the Holocene (Kononova et al., 2022). The water in the lake was warm and mineralized before 4.3 cal ka BP; later the water became colder and less mineralized, and the lake level became more volatile. The lake level considerably dropped about 3.3–2.2 cal ka BP and the lake had a low level of water exchange since then. Thus, a cardinal change of the lake ecosystem occurred about 4.3 cal ka BP.

Pollen and diatom data from salt Lake Bolshoye Yarovoye, located further south in the Kulunda lowland, showed a general predominance of steppe conditions in the region during the last 4.4 cal ka BP (Rudaya et al., 2012). The climate was mostly warm and dry with an extension of semi-desert landscapes between 4.4 and 3.75 cal ka BP. The intrazonal pine forests appeared in Kulunda after 3.75 cal ka BP.

Arid steppe and semi-desert landscapes also prevailed in northern Kazakhstan earlier 5.5 ka BP. After this period, the climate became wetter (Kremenetski et al., 1997).

Both pollen (Rudaya et al., 2020) and geochemical data from salt Lake Maloye Yarovoye characterize climate and vegetation changes in Kulunda since the late glacial time. Steppe and desert biomes dominated in the region throughout the Holocene, but data indicate significant changes in the level of the lake, reflecting variations in humidity. The lake existed from ca. 13 cal ka BP and had a rather high water level in the



Fig.1. Location of studied lakes.

beginning of the Holocene. A considerable salinization occurred 10.4–8.9 cal ka BP resulted in abundant precipitation of gypsum, halite and calcite; the lake temporarily transformed to playa between 10.2 and 10.0 cal ka BP. The maximum salinity of the lake is recorded for a period of 9.8–9.4 cal ka BP, when ternadite and hydroglauberite were deposited. However, vegetation proxy indicate a total maximum in annual precipitation (PANN) 9.8–9.7 cal ka BP. Precipitation decreased 9.3–7 cal ka BP combined with a cooling manifested by declining vegetation diversity.

Geochemical conditions changed and carbonates actively precipitated in the interval of 8.9–6.4 cal ka BP. This change precedes the climatic optimum of the Holocene, which began 7.5–7 and terminated 3.6–2.7 cal ka BP in the region (Rudaya et al., 2020). Significant change in the mineral and geochemical composition of the sediments suggests deep-water lake conditions of 6.4–0 cal. ka BP. The sediment is dominated by terrigenous quartz, chlorite and potassium feldspar, the

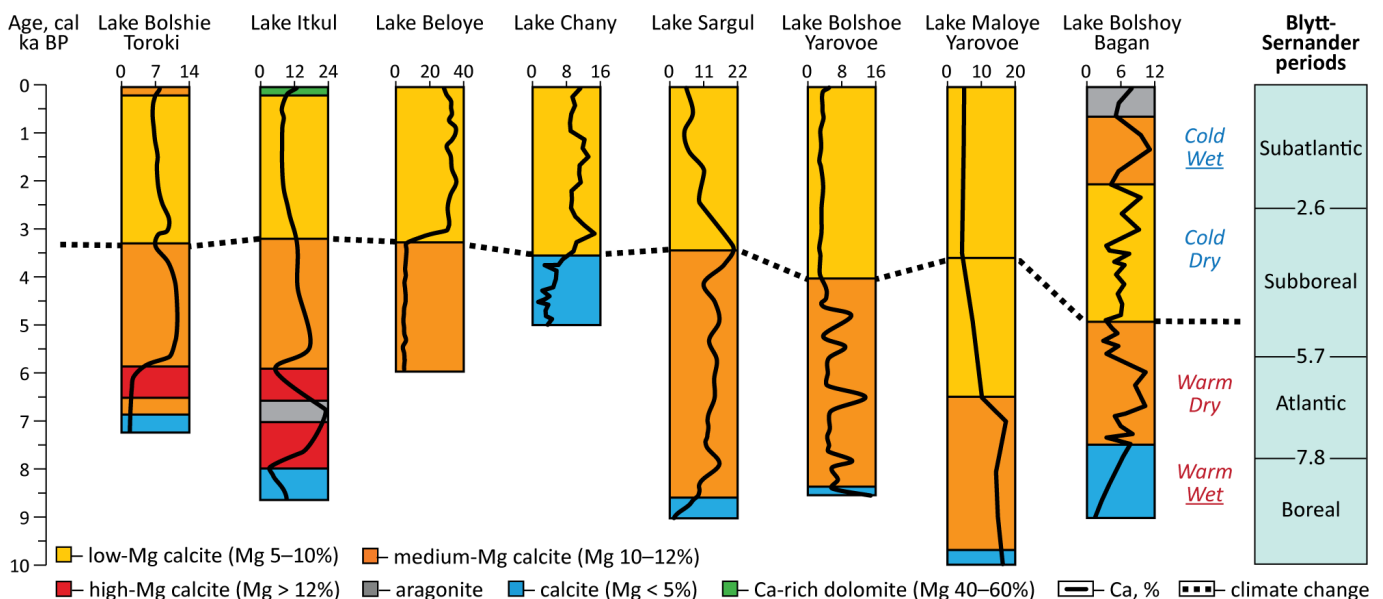


Fig.2. Indication of climate changes by changes in carbonate minerals and total Ca in sediments of studied lakes in the south of Western Siberia.

autigenic halite and low-Mg calcite content is small, and sulfate minerals are absent. The pollen data confirm high level of the lake between 6.6 and 1.3 cal ka BP with a maximum at 6.6–6 cal ka BP.

Our data from salt Lake Bolshoy Bagan also indicate several (cyclic) climate fluctuations during the last 9 ka BP (Maltsev et al., 2022). The climate was warmer and wetter 9–7.5 cal ka BP and became drier 7.5–5.3 cal ka BP with a peak in carbonates precipitation in the lake falls to 6.9–5.8 cal ka BP, which may correspond to Bond-4 drought event. These results are similar to the results from lakes Itkul and Bolshie Toroki. The unstable climate with frequent alternation of short dry and wet episodes was characterized by a time interval of 5.3–2.1 cal ka BP, and the cooling trend is well visible for 2.1–0.2 cal ka BP. Thus, the Bolshoy Bagan data clearly indicates that the climate was warmer and drier prior to 5.3 cal ka BP and colder afterwards.

4. Conclusions

Summarizing the reviewed data, we can say that the middle Holocene warm and dry epoch ended in the south of Western Siberia 5.5–4 cal ka BP with the further onset of more humid and cold conditions. Significant changes in the regional climate probably occurred about 3.6–3.1 cal ka BP that is marked by an increase in the content of carbonates in the sediments, and by changes in vegetation (Krivonogov et al., 2012a;b; 2023; Zhilich et al., 2017; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020). In addition, we see a general trend in the content of Mg in carbonate fraction of the lake sediments (Figure 2), indicating a variation in the water salinity as a consequence of the regional climate change.

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR according to the research Projects 19-29-05085 mk, 21-55-53037 GFEN_a, 19-05-00403 A, and Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Work is done on state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Projects No 122041400193-7. Analytical studies were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research IGM SB RAS.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Kononova V.A., Krivonogov S.K., Leonova G.A. et al. 2022. Paleocological reconstruction of Lake Sargul in Holocene based on ostracod analysis. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1438–1440.
- Kremenetski C.V., Tarasov P.E., Cherkinsky A.E. 1997. The Latest Pleistocene in Southwestern Siberia and Kazakhstan. *Quaternary International*. 41-42: 125–134.
- Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M. et al. 2012. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: Evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Belye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332 (1): 177–193.
- Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H. et al. 2012. An abrupt ecosystem change in Lake Belye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332, 194–206.
- Krivonogov S.K., Zhdanova A.N., Solotchin P.A. et al. 2023. The Holocene environmental changes revealed from the sediments of the Yarkov sub-basin of Lake Chany, south-western Siberia. *Geoscience Frontiers*. 14: 101518.
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2020. Geochemistry of Carbonates in Small Lakes of Southern West Siberia Exemplified from the Holocene Sediments of Lake Itkul. *Russ. Geol. Geophys.* 61 (3): 303–321. DOI: [10.15372/RGG2019081](https://doi.org/10.15372/RGG2019081)
- Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Miroshnichenko L.V. et al. 2022. Geochemical indication of the Holocene climatic changes in sediments of Bolshoi Bagan Lake, Southern West Siberia. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1485–1487. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485)
- Rudaya N., Nazarova L., Nourgaliev D. et al. 2012. Mid-late Holocene environmental history of Kulunda, southern West Siberia: vegetation, climate and humans. *Quaternary Science Reviews*. 48: 32–42.
- Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* 249: 106616.
- Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2019. Authigenic Carbonates from Holocene Sediments of Lake Itkul (South of West Siberia) as Indicators of Climate Changes. *Dokl. Earth Sci.* 487 (1): 745–750. DOI: [10.1134/S1028334X19070079](https://doi.org/10.1134/S1028334X19070079)
- Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2021. Mineralogical Indicators of Climate Changes in Southwestern Siberia in Holocene Sediments of Bolshie Toroki Lake. *Dokl. Earth Sci.* 496 (1): 17–23. DOI: [10.1134/S1028334X21010220](https://doi.org/10.1134/S1028334X21010220)
- Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. et al. 2017. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population. *Quaternary Science Reviews*. 163 (1): 152–161.

Эволюция озер и изменение климата юга Западной Сибири

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYМальцев А.Е.^{1*}, Кривоногов С.К.^{1,2}, Солотчина Э.П.¹, Смоленцева Е.Н.³¹ Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С. СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия² Кызылординский университет им. Коркыт-Ата, Айтеке би, 29А, Кызылорда, 120014, Казахстан³ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 8/2, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Теплый и сухой период в середине голоцена (до ~5.5–4 тыс. л. н.) с последующим увлажнением и похолоданием фиксируется в районе юга Западной Сибири по данным осадков ряда озер. На рубеже около 3.6–3.1 тыс. л.н. на исследуемой территории произошло существенное изменение природно-климатических обстановок, которое отражается как в росте содержания карбонатов в осадках, так и в изменении спорово-пыльцевых ассоциаций. Наблюдается единый тренд изменения содержания Mg в карбонатах, свидетельствующий о колебаниях солености воды, что является следствием региональных палеоклиматических флуктуаций. Зафиксирована циклическая смена периодов иссушения/увлажнения голоценового климата юга Западной Сибири.

Ключевые слова: Соленые озера, палеоклимат, минералого-геохимические индикаторы, карбонаты, голоцен, донные отложения, Западная Сибирь

Для цитирования: Мальцев А.Е., Кривоногов С.К., Солотчина Э.П., Смоленцева Е.Н. Эволюция озер и изменение климата юга Западной Сибири // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 421-427. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-421

1. Введение

Комплексные минералого-геохимические исследования донных отложений ряда озер юга Западной Сибири (Рис. 1) показали, что во второй половине голоцена на исследуемой территории имели место значительные изменения природно-климатических обстановок (Krivonogov et al., 2012a; b; 2023; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020; 2022). Они нашли свое отражение в литолого-минералогических и геохимических особенностях донных осадков, за последние примерно 9 кал. тыс. л. н., определяемые циклами аридизации/гумидизации регионального климата (Рис. 2).

2. Материалы и методы

По данным исследования двух солоновато водных озер Восточно-Барабинской низменности (Большие Тороки и Иткуль) нами было установлено, что примерно 8.7–7.8 тыс. л. н. региональный климат был теплым и влажным. Аридизация климата наступает ~7.8–5.3 кал. тыс. л. н. Во временном интервале 5.9–5.3 тыс. л. н. было установлено

проявление (с определенным временным лагом) глобального климатического события Бонда 4. Экологическая реконструкция растительности и климата донных отложений оз. Большие Тороки подтвердила самый теплый и сухой период с 7.0 до 5.0 тыс. л. н. (Zhilich et al., 2017). В суббореале (~5.3–3.1 тыс. л. н.) климат стал более прохладным, однако влажность его не увеличилась, о чем свидетельствует достаточно интенсивное осаждение хемогенных карбонатов. Палеонтологические данные также показывают тенденцию к похолоданию после 5.5 тыс. л. н., когда начала формироваться лесостепь (Zhilich et al., 2017). Около 3.1–0 тыс. л.н. отмечается рост гумидности климата, однако увеличение содержания Са и карбонатов в последних сантиметрах осадков может свидетельствовать о росте аридности на современном этапе.

3. Результаты и обсуждение

Палеонтологические данные (пыльца, растительные макроископаемые, диатомовые водоросли и остракоды) из отложений оз. Белое, расположенного в лесостепной зоне юга Западной Сибири,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: maltsev@igm.nsc.ru (А.Е. Мальцев)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



позволили выделить «холодную» (3.4–2.3 тыс. л. н.) и «сухую» (2.8–1.7 тыс. л. н.) стадии в среднем-позднем голоцене (Krivonogov et al., 2012a,b). Стадия сухого климата совпадает с понижением уровня озера 2.6–1.5 тыс. л. н. В дальнейшем климат стал более теплым и влажным, что привело к максимально высокому уровню озера 1.3–0.2 тыс. л. н., а затем последовало понижение уровня воды. Структура донных отложений и биогеохимические данные показали резкое изменение экосистемы озера около 3.4 кал. тыс. л. н. — тип озера сменился с эвтрофного на олиготрофное. Это могло быть вызвано, в первую очередь, сменой климата, который был более теплым и влажным до 3.4 тыс. л. н., а после этого — более прохладным и сухим (Krivonogov et al., 2012a).

Биогеохимические и палеонологические данные из донных отложений оз. Чаны также показывают региональное изменение климата с ~4 тыс. л.н. в Западно-Сибирской лесостепи и степи (Krivonogov et al., 2023). Отмечаются относительно низкие температуры между 3.6 и 2.2 тыс. л. н., далее произошло постепенное повышение температур (с максимальными значениями ~0.7–0.4 тыс. л. н.), которое сменилось их последующим снижением. Биомаркеры выявили три более холодных и влажных эпизода: 3.3–2.1, 1.4–1.0 и 0.45–0.15 тыс. л. н. При этом условия до 3.6 тыс. л.н. были достаточно засушливыми, с последующим быстрым увеличением влажности климата (Krivonogov et al., 2023).

Палеоэкологическая реконструкция истории развития оз. Саргуль (Барабинская низменность) на основе анализа остракод показала два этапа его эволюции в голоцене (Konovalova et al., 2022). До 4.3 тыс. л. н. вода озера была теплой и минерализованной. После этого отмечается колебания уровня и солености озера, а озерные воды становятся менее минерализованными и более холодными. Около 3.3–2.2 тыс. л. н. уровень озера упал и в дальнейшем в озере наблюдался низкий уровень водообмена. Т.е. на рубеже 4.3 тыс. л. н. произошло кардинальное изменение озерной экосистемы.

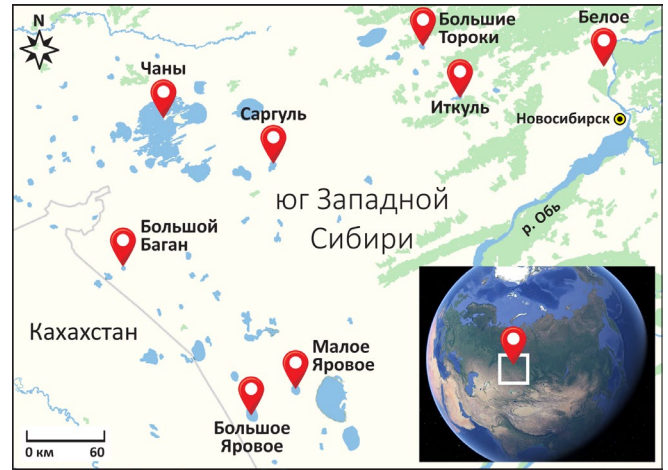


Рис.1. Расположение исследованных озер.

Экологическая реконструкция растительности и климата на основе данных о пыльце и диатомовых водорослях соленого озера Большое Яровое в Кулунде, на юге Западной Сибири, показала общее преобладание степи в течение последних 4.4 тыс. л. н. в районе исследования (Rudaya et al., 2012). В условиях относительно теплого и сухого климата открытые полупустынные и сухие степи с березовыми лесами распространялись между 4.4 и 3.75 тыс. л. н. Появление хвойных лесов в Кулунде началось после 3.75 тыс. л. н. (Rudaya et al., 2012).

Данные пыльцевого и геохимического анализов для донных отложений соленого оз. Малое Яровое позволили провести реконструкцию климата и биоразнообразия Кулундинской степи (Rudaya et al., 2020). Увеличение влажности климата в Степном Алтае пришлось на начало голоцена (11.7 тыс. л. н.), со значительным ростом в интервале 9.8–9.7 тыс. л. н., что привело к подъему уровня озера после 10.6 тыс. л. н. Около 10.4–8.9 тыс. л. н. отмечается рост солености озера, когда содержания аутигенных минералов в осадке резко возрастает, и они представлены преимущественно

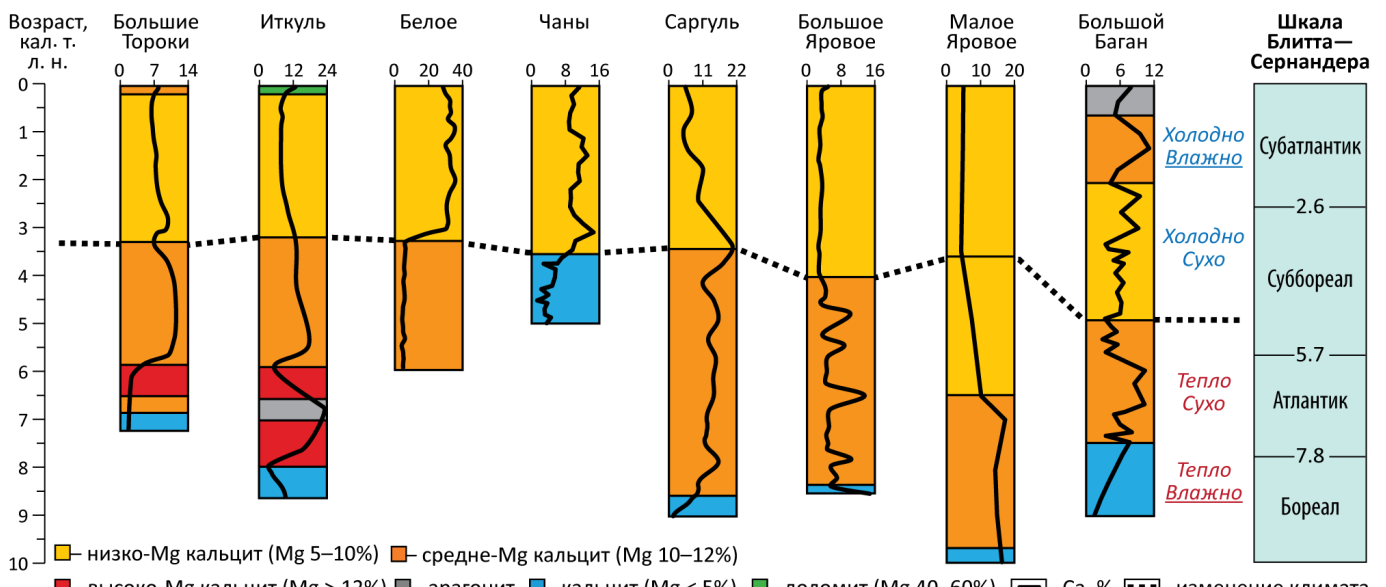


Рис.2. Минералого-геохимические индикаторы изменения климата голоцена и эволюция озер юга Западной Сибири.

водорастворимыми солями: гипсом, ангидритом, галитом, а также кальцитом. Пик солености приходится на 9.8–9.4 тыс. л. н., что сопровождается осаждением тернадита и гидроглауберита. Количество осадков незначительно уменьшилось около 9.3–7 тыс. л. н., что, вероятно, сопровождалось тенденцией похолодания, которая отражается в уменьшении растительного разнообразия (Rudaya et al., 2020). Это привело к активному осаждению карбонатов и росту их содержания в осадке 8.9–6.4 тыс. л. н. Изменение минерального и химического состава донных отложений 6.4–0 тыс. л. н. указывает на усиление береговой эрозии и соответствует стадии «глубокого озера». Минеральный состав осадка представлен большим количеством терригенного материала (кварц, хлорит, КППШ) и меньшими содержаниями галита, низко-магнезиального кальцита, полным отсутствием сульфатных минералов. Данные пылецевого анализа подтверждают высокое стояние озерных вод между 6.6 и 1.3 тыс. л. н., с максимальным уровнем 6.6–6 тыс. л. н. Оптимальные условия для растительного разнообразия на Степном Алтае и юге Западной Сибири начинаются 7.5–7 и заканчиваются 3.6–2.7 тыс. л. н. (Rudaya et al., 2020).

Геохимия осадков соленого оз. Большой Баган подтверждает циклы аридизации/гумидизации в голоцене (Maltsev et al., 2022). Летопись донных отложений озера охватывает временной период в 9 тыс. лет, что позволяет получить данные о ранних этапах голоцена (после 7 тыс. л. н.). Так, около 9–7.5 кал. тыс. л. н. в районе исследования был теплый и влажный климат, который сменили засушливые природные обстановки примерно 7.5–5.3 кал. тыс. л. н. с пиком карбонатности осадка 6.9–5.8 кал. тыс. л. н., который может соответствовать глобальному климатическому событию Бонда 4. Что совпадает с результатами, полученными из осадков озера Иткуль и Большие Тороки. Для временного интервала 5.3–2.1 кал. тыс. л. н. характерен неустойчивый климат, с частой сменой коротких сухих и влажных эпизодов, а ~2.1–0.2 кал. тыс. л. н. наметился тренд на похолодание климата. Таким образом, летопись донных отложений оз. Большой Баган фиксируются теплый и сухой период голоцена на протяжении ~9–5.3 кал. тыс. л. н. с последующим похолоданием. В северном Казахстане (который граничит с озером) также до ~5.5 тыс. л.н. преобладали засушливые степные и полупустынные ландшафты. После этого периода климат стал влажнее (Kremenetski et al., 1997).

4. Заключение

Можно заключить, что теплый и сухой период в середине голоцена с последующим увлажнением и похолоданием фиксируется в районе юга Западной Сибири до ~5.5–4 тыс. л. н. На рубеже около 3.6–3.1 тыс. л. н. на исследуемой территории произошло существенное изменение природно-климатических обстановок, которое отражается как в росте содержания карбонатов в осадках, так и в измене-

нии спорово-пыльцевых ассоциаций (Krivonogov et al., 2012a; b; 2023; Zhilich et al., 2017; Solotchina et al., 2019; 2021; Maltsev et al., 2020). Наблюдается единый тренд изменения содержания Mg в карбонатах донных отложений региональных озер (Рис. 2), свидетельствующий о колебаниях солености воды, что является следствием региональных палеоклиматических флуктуаций. Однако следует отметить, что циклическая смена периодов иссушения/увлажнения голоценового климата, зафиксированная в карбонатсодержащих донных осадках озер юга Западной Сибири, наблюдается и для большинства озер Западной Сибири. Таким образом, речь идет о влиянии глобальных климатических процессов, протекавших на территории Северного полушария в позднечетвертичное время.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-29-05085 мк, 21-55-53037 ГФЕН_а, 19-05-00403 А. Работа выполнена по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (проект № 122041400193-7) в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Konovalova V.A., Krivonogov S.K., Leonova G.A. et al. 2022. Paleoeological reconstruction of Lake Sargul in Holocene based on ostracod analysis. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1438–1440.
- Kremenetski C.V., Tarasov P.E., Cherkinsky A.E. 1997. The Latest Pleistocene in Southwestern Siberia and Kazakhstan. *Quaternary International*. 41-42: 125–134.
- Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M. et al. 2012. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: Evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Belye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332 (1): 177–193.
- Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H. et al. 2012. An abrupt ecosystem change in Lake Belye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 331–332, 194–206.
- Krivonogov S.K., Zhdanova A.N., Solotchina P.A. et al. 2023. The Holocene environmental changes revealed from the sediments of the Yarkov sub-basin of Lake Chany, southwestern Siberia. *Geoscience Frontiers*. 14: 101518.
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2020. Geochemistry of Carbonates in Small Lakes of Southern West Siberia Exemplified from the Holocene Sediments of Lake Itkul. *Russ. Geol. Geophys.* 61 (3): 303–321. DOI: [10.15372/RGG2019081](https://doi.org/10.15372/RGG2019081)
- Maltsev A.E., Krivonogov S.K., Miroshnichenko L.V. et al. 2022. Geochemical indication of the Holocene climatic changes in sediments of Bolshoi Bagan Lake, Southern West Siberia. *Limnology and Freshwater Biology*. 2022 (4): 1485–1487. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1485)

Rudaya N., Nazarova L., Nourgaliev D. et al. 2012. Mid-late Holocene environmental history of Kulunda, southern West Siberia: vegetation, climate and humans. *Quaternary Science Reviews*. 48: 32–42.

Rudaya N., Krivonogov S., Słowinski M. et al. 2020. Postglacial history of the Steppe Altai: Climate, fire and plant diversity. *Quat. Sci. Rev.* 249: 106616.

Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2019. Authigenic Carbonates from Holocene Sediments of Lake Itkul (South of West Siberia) as Indicators of Climate Changes. *Dokl. Earth Sci.* 487 (1): 745–750. DOI: [10.1134/S10283334X19070079](https://doi.org/10.1134/S10283334X19070079)

Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2021. Mineralogical Indicators of Climate Changes in Southwestern Siberia in Holocene Sediments of Bolshie Toroki Lake. *Dokl. Earth Sci.* 496 (1): 17–23. DOI: [10.1134/S10283334X21010220](https://doi.org/10.1134/S10283334X21010220)

Zhilich S., Rudaya N., Krivonogov S. et al. 2017. Environmental dynamics of the Baraba forest-steppe (Siberia) over the last 8000 years and their impact on the types of economic life of the population. *Quaternary Science Reviews*. 163 (1): 152–161.

Lake level dynamics in the centre of the East European Plain during the Holocene

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Konstantinov E.A.* , Karpukhina N.V., Zakharov A.L., Rudinskaya A.I.,
Ukraintsev V.Yu., Samus A.V., Lazukova L.I.

Institute of Geography RAS, 29 building 4 Staromonetny lane, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. Based on the lithostratigraphic and geomorphological approach, the study of lake level fluctuations in Nero and Seliger over the past 15,000 years was conducted. Common features of level changes were revealed: deep regression at the end of the late glacial period and early Holocene, intensive rise in level in the early-middle Holocene, stabilization (with a slight upward trend) in the late Holocene. Similar features in level changes were revealed in the history of a number of lakes in Germany and Scandinavia. A connection was found between lake level fluctuations and the intensity of fluvial processes in the center of the East European Plain.

Keywords: lake level history, Holocene, paleolimnology, radiocarbon dating, river runoff

For citation: Konstantinov E.A., Karpukhina N.V., Zakharov A.L., Rudinskaya A.I., Ukraintsev V.Yu., Samus A.V., Lazukova L.I. Lake level dynamics in the centre of the East European Plain during the Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 428-433. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-428

1. Introduction

Lake level variations reflect the hydroclimatic dynamics of the late Quaternary. A direct connection with climate is manifested in endorheic lakes of semi-arid and arid zones, where the lake level is determined only by the balance of precipitation and evaporation. In a humid climate, where there is an excess of precipitation, the vast majority of lakes are flowing, i.e. they have a runoff. In such lakes, the position of the water surface is determined, first of all, by the height of the runoff threshold. Here, the connection between the level and the climate is not so direct. The influence of climate is transformed by landscape, hydrological and geomorphological factors.

The article presents the results of a study of the dynamics of the lakes of the upper Volga basin: Nero (Yaroslavl region) and Seliger (Tver region). A comparison is made with the history of the level of runoff lakes in Central and Northern Europe. A mechanism for changing the level of alluvial-dammed lakes in the center of the East European Plain is proposed.

2. Materials and methods

Lake Seliger is a system of 24 semi-isolated bays (the so-called reaches), forming a cross in plan. The

length of the lake from north to south is 60 km, from west to east - 35 km. The lake has an area of 212 km², an average depth of 5.8 m and a maximum of 24 m. The catchment area of the lake is 2310 km². A normal level of the lake is 205.48 m. The amplitude of level fluctuations recorded during the observation period is 206 cm. In the annual course of the level, two peaks are observed - spring and autumn, which are comparable in their volumes. Seliger has more than 100 tributaries. The largest tributaries are the Krapivenka, Soroga and Seremukha rivers. The Selizharovka River flows out of Lake Seliger, which flows into the Volga near the urban-type settlement of Selizharovo.

Lake Nero, the largest lake in the Yaroslavl Volga region, is located in the southern part of the Rostov Basin. The area of the water surface (58 km²) is only about 8% of the total area of the Rostov Basin. The lake is stretched from southwest to northeast, has a pear-shaped form - with a narrow northern and widened southern part. Lake Nero is a flowing reservoir. The Sara River and about 20 other small rivers and streams flow into it: Vorzhenka, Voksitsa, Sulost, Seletskaya, Vorobylovskaya, Glubokaya, Serebryanka, Vanoga, Mazikha, Ishnya, Kuchibozh, etc. The Veksa River flows out of the lake, which, after merging with the Ustye River, gives rise to the Kotorosl River. The length of the lake is 13.2 km, the maximum width is 8.3 km,

*Corresponding author.

E-mail address: eakonst@igras.ru (E.A. Konstantinov)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the average depth is 1.6 m, the maximum depth is 4.7 m (Bikbulatov et al., 2003). Before the construction of the artificial dam on the Veksa River, the average long-term water level was 93.75. In average water years, the amplitude of water level fluctuations is 1.2–1.3 m. In low-water years with little precipitation, the amplitude could reach 3 m (Bikbulatov et al., 2003). During the observation period, the maximum water level was recorded at 96.37 m, the minimum at 93.09 m.

The structure of the bottom sediments of the lakes was studied using manual drilling with a modified Livingstone piston drill and ground penetrating radar profiling. Drilling profiles were laid across the underwater coastal slope – from the shore to the deep-water part. In Seliger, two stretches of water bodies were also studied, resembling flooded parts of river valleys in morphology. A total of 9 cores were obtained for Lake Seliger and 12 cores for Lake Nero.

Radiocarbon dating, loss on ignition, particle size distribution, diatom analysis and pollen analysis were performed from the cores of the reference boreholes. The structure of the coastal sediments was investigated using hand drilling. The reconstruction of the level change curve is based on the analysis of the age and altitude of the stratigraphic unconformities on the borehole profiles, which mark the declines in the level and erosion of the bottom sediments. Additional information on the sedimentation environments was obtained from the analysis of the lithological composition of the sediments and the results of paleobotanical studies.

3. Results

Seliger. Drilling showed that in the southern bays of Seliger, lake silts several meters thick are underlain by coarse-grained sands, most likely of river origin. This is evidenced by the characteristic asymmetric profile of the bottom in the supposed areas of ancient river bends and the time of transition from active runoff to stagnant conditions of the reservoir – starting from 14.5 thousand years ago: at that time, the edge of the glacier was already far away and meltwater from the glacier did not penetrate this territory. It has been shown that the flooding of areas of river valleys and their transformation into lake reaches was caused by the damming of the Selizharovka River, which originally flowed out of Lake Seliger in the Ostashkov area. About 14.5 thousand years ago, the Selizharovka began to be dammed by the intensively growing internal delta of its left tributary, the Krapivenka River. The water level in the lake rose in the Late Glacial and Holocene and was about 7–8 m. The maximum rate of lake level growth occurred in the Late Glacial and Early Holocene.

Nero. A deep regression of the lake level in Nero was established in the Late Glacial and Early Holocene. Stratigraphic unconformities in the sediments record a stage of low water level (below 87 m abs.) in the interval from 14.7 to 10.0 thousand years ago. The lake decreased in size several times, and the reservoir was preserved only in the axial, deepest part of the basin. A large transgressive phase was recorded at the end of the

Boreal and Atlantic period of the Holocene, from 9.0 to 6.5 thousand years ago. The lake level reached 91–94 m abs., which is close to modern values. The average long-term lake level in the Holocene did not rise above 94.2 m. In the interval 6.5–2.4 thousand years ago, weak regressive phases were established in the dynamics of the average long-term level. The lake level was approximately 1–3 m lower than today. Beginning 2.4 thousand years ago, the level of Lake Nero slowly increased, reaching modern state approximately 300–500 years ago.

4. Discussion and conclusions

According to the most common concepts, the level of lakes in the central VER is directly related to the degree of climate humidity: more arid stages correspond to a low level, and more humid stages to a high level (Harrison et al., 1996; Wohlfarth et al., 2006). However, the above results on the history of lakes Nero and Seliger cannot be explained solely by changes in climate humidity. Changes in lake levels are in poor agreement with the course of precipitation changes. Similar trends in levels have been established for a number of lakes in northeastern Germany and Sweden (Theuerkauf et al., 2022; Digerfeldt et al., 2013): deep regression at the end of the late glacial and early Holocene, an intense rise in level in the early-middle Holocene, stabilization (with a slight upward trend) in the late Holocene.

The probable cause of the level fluctuations should be sought in the change in the height of the runoff threshold, which determines the level in the runoff lakes of the humid zone. The analysis of the relief and structure of sediments in the areas of runoff from Lakes Nero and Seliger (the Veksa and Selizharovka rivers, respectively) shows that the height of the runoff threshold is controlled, first of all, by alluvial accumulation (or erosion) in the channels of large side tributaries – the Ustye-Kotorosl and Krapivenka rivers. The internal deltas of these rivers form an alluvial dam that maintains the current relatively high level of the lakes. Thus, the channel system of Ustye-Kotorosl at the confluence of the Veksa is in the mode of intensive accumulation and growth of the bottom height, as evidenced by the extremely frequent meandering and the embanked nature of the channels. Before the construction of the dam in Belogostitsy, during large floods on Ustye-Kotorosl, even reverse slopes along the Veksa were noted (Bikbulatov et al., 2003), which led to counterflow of water and floods on Lake Nero. All this points to a direct dependence of the Nero level on the erosion-accumulative regime in the Ustye-Kotorosl river system. The curves of the Nero and Seliger lake levels (Konstantinov et al., 2021; Konstantinov et al., 2023) reveal a close relationship with the diagram of the intensity of fluvial processes (Panin and Matlakhova, 2015). A major regression of lakes in the late glacial and early Holocene was caused by extremely high water discharges and deep incision of river channels in the region. This resulted in a significant drop in the height of the lake runoff threshold. Thus, Lake Nero

actually did not exist in the early Holocene; it looked like a small lake-like expansion at the confluence of the Sara and Ishnya rivers. The increase in the lake level in the Atlantic period coincides with the minimum river runoff in the Holocene, which created the prerequisites for intensive alluvial accumulation in sections of channels with low slopes of the longitudinal profile. This led to the creation of alluvial dams that dammed the lower reaches of the Sara and Ishnya rivers (in the case of Nero) and Selizharovka (in the case of Seliger). Further stabilization of the lake level with a slight upward trend is consistent with a decrease in the amplitude of fluvial dynamics. Since the identified mechanism of lake level fluctuations has a regional determinacy, lakes with a similar history are probably quite widespread in central and eastern Europe.

Acknowledgements

The work was funded by the state assignment FMVS-2024-0003 “Reconstruction of natural events of the past on the territory of Russia based on the study of sedimentary paleoarchives”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S. et al. 2003. Hydrology and hydrochemistry of Lake Nero. (In Russian)
- Digerfeldt G., Björck S., Hammarlund D. et al. 2013. Reconstruction of Holocene lake-level changes in Lake Igelsjön, southern Sweden. *GFF* 135(2): 162-170. DOI: [10.1080/11035897.2013.799514](https://doi.org/10.1080/11035897.2013.799514)
- Harrison S.P., Yu G.E., Tarasov P.E. 1996. Late Quaternary lake-level record from northern Eurasia. *Quaternary research* 45(2): 138-159. DOI: [10.1006/qres.1996.0016](https://doi.org/10.1006/qres.1996.0016)
- Konstantinov E.A., Karpushina N.V., Zakharov A.L. et al. 2023. Fluctuations in the level of Lake Nero during the Holocene. *Geomorphologia and paleogeographia* 54(2): 51-60. DOI: [10.31857/S2949178923020044](https://doi.org/10.31857/S2949178923020044). (In Russian)
- Konstantinov E.A., Panin A.V., Karpushina N.V. et al. 2021. The fluvial past of Lake Seliger. *Water Resources* 48(5): 481-491. DOI: [10.31857/S0321059621050114](https://doi.org/10.31857/S0321059621050114). (In Russian)
- Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena* 130: 46-61. DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)
- Theuerkauf M., Blume T., Brauer A. et al. 2022. Holocene lake-level evolution of Lake Tiefer See, NE Germany, caused by climate and land cover changes. *Boreas* 51(2): 299-316. DOI: [10.1111/bor.12561](https://doi.org/10.1111/bor.12561)
- Wohlfarth B., Tarasov P., Bennike O. et al. 2006. Late glacial and Holocene palaeoenvironmental changes in the Rostov-Yaroslavl'area, West Central Russia. *Journal of Paleolimnology* 35: 543-569. DOI: [10.1007/s10933-005-3240-4](https://doi.org/10.1007/s10933-005-3240-4)

Динамика уровня озер центра Восточно-Европейской равнины в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Константинов Е.А.* , Карпухина Н.В., Захаров А.Л., Рудинская А.И.,
Украинцев В.Ю., Самусь А.В., Лазукова Л.И.

Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, г. Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. На основе литостратиграфического и геоморфологического подхода проведено исследование колебаний уровня озер Неро и Селигер за последние 15000 лет. Выявлены общие черты изменения уровня: глубокая регрессия в конце позднеледниковья и раннем голоцене, интенсивный подъем уровня в раннем-среднем голоцене, стабилизация (с небольшим трендом на повышение) в позднем голоцене. Сходные черты в изменении уровня выявлены в истории ряда озер Германии и Скандинавии. Обнаружена связь между колебаниями уровня озер и интенсивностью флювиальных процессов в центре Восточно-Европейской равнины.

Ключевые слова: история уровня озера, голоцен, палеолимнология, радиоуглеродное датирование, речной сток

Для цитирования: Константинов Е.А., Карпухина Н.В., Захаров А.Л., Рудинская А.И., Украинцев В.Ю., Самусь А.В., Лазукова Л.И. Динамика уровня озер центра Восточно-Европейской равнины в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 428-433. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-428

1. Введение

Колебания уровня озер отражают гидроклиматическую динамику конца четвертичного периода. Напрямую связь с климатом проявляется в бессточных озерах семиаридных и аридных зон, где уровень озер определяется только балансом осадков и испарения. В гумидном климате, где имеется избыток осадков, подавляющее большинство озер проточные – т.е. они обладают стоком. В таких озерах положение водной поверхности определяется, прежде всего, высотой порога стока. Здесь связь уровня с климатом не такая прямая. Влияние климата трансформируется ландшафтными, гидрологическими и геоморфологическими факторами.

В статье представлены результаты исследования динамики уровня озер бассейна верхней Волги: Неро (Ярославская область) и Селигер (Тверская область). Проведено сопоставление с историей уровня сточных озер Центральной и Северной Европы. Предложен механизм изменения уровня аллювиально-подпрудных озер Центра Восточно-Европейской равнины (ВЕР).

2. Материалы и методы

Озеро Селигер представляет собой систему из 24 полуизолированных заливов (так называемых плесов), образующих в плане форму креста. Протяженность озера с севера на юг – 60 км, с запада на восток – 35 км. Озеро имеет площадь 212 км², среднюю глубину 5.8 м и максимальную 24 м. Площадь водосбора озера составляет 2310 км². Нормальный уровень озера составляет 205.48 м. Зафиксированная за период наблюдений амплитуда колебаний уровня составляет 206 см. В годовом ходе уровня наблюдается два пика – весенний и осенний, которые сопоставимы по своим объемам. Селигер имеет более 100 притоков. Самые крупные притоки - реки Крапивенка, Сорога и Серемуха. Вытекает из озера Селигер река Селижаровка, которая в районе п.г.т. Селижарово впадает в Волгу.

В южной части Ростовской котловины расположено озеро Неро – крупнейшее озеро Ярославского Поволжья. Площадь водного зеркала (58 км²) составляет лишь около 8 % от общей площади Ростовской котловины. Озеро вытянуто с

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: eakonst@igras.ru (Е.А. Константинов)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



юго-запада на северо-восток, имеет грушевидную форму - с узкой северной и расширенной южной частью. Озеро Неро - проточный водоем. В него впадает река Сара и еще около 20 небольших речек и ручьев (Ворженка, Воксица, Сулость, Селецкая, Воробыловская, Глубокая, Серебрянка, Ванога, Мазиха, Ишня, Кучибожь и др.). Вытекает из озера р. Векса, которая после слияния с р. Устье дает начало р. Которосль. Длина озера - 13.2 км, максимальная ширина - 8.3 км, средняя глубина - 1.6 м, максимальная глубина - 4.7 м (Бикбулатов и др., 2003). До строительства гидроузла на р. Векса среднемноголетний уровень составлял - 93.75. В средние по водности годы амплитуда колебания уровня составляет 1.2-1.3 м. В маловодные годы при малом количестве осадков амплитуда могла достигать 3 м (Бикбулатов и др., 2003). За период наблюдений максимальный уровень зафиксирован на отметке 96.37 м, минимальный - 93.09 м.

Строение донных отложений озер было исследовано при помощи ручного бурения модифицированным поршневым буром Ливингстона и георадарного профилирования. Буровые профили закладывались поперек подводного берегового склона - от берега к глубоководной части. В Селигере также исследовано два участка плесов, напоминающих по морфологии затопленные части речных долин. В общей сложности для озера Селигер получено 9 кернов, для озера Неро 12 кернов. Для образцов из кернов опорных скважин выполнялось радиоуглеродное датирование, определение потерь при прокаливании, гранулометрического состава, диатомовый и спорово-пыльцевой анализы. При помощи ручного бурения исследовано строение отложений побережья. Реконструкция кривой изменения уровня опирается на анализ возраста и высоты стратиграфических несогласий на буровых профилях, которые маркируют снижения уровня и размыва донных отложений. Дополнительные сведения об обстановках осадконакопления были получены из анализа литологического состава осадков и результатов палеоботанических исследований.

3. Результаты

Селигер. В результате бурения установлено, что на извилистых участках южных селигерских плесов озерные илы мощностью в первые метры подстилаются крупными песками, имеющими, скорее всего, речное происхождение. В пользу этого говорит характерный асимметричный профиль дна на предполагаемых участках древних речных излучин и время перехода от активного стока к режиму стоячего водоема - начиная с 14.5 тыс. л. н.: в это время край ледника располагался уже далеко и талые ледниковые воды на эту территорию не проникали. Показано, что подтопление участков речных долин и их превращение в озерные плесы было вызвано подпруживанием р. Селижаровки, изначально вытекавшей из оз. Селигер в районе г. Осташкова. Около 14.5 тыс. л. н. Селижаровка начала подпруживаться интенсивно растущей внутренней дельтой своего

левого притока, р. Крапивенки. Подъем уровня воды в озере происходил на протяжении позднеледниковья и голоцена и составил суммарно около 7-8 м. Максимальные скорости роста уровня озера пришлись на позднеледниковье и начало голоцена.

Неро. Установлена глубокая регрессия уровня озера Неро в позднеледниковье и начале голоцена. Стратиграфические несогласия в осадках фиксируют этап низкого положения уровня (ниже 87 м абс.) в интервале от 14.7 до 10.0 тыс.л.н. Озеро сокращалось в размерах в несколько раз, водоем сохранялся только в осевой наиболее глубокой части котловины. Крупная трансгрессивная фаза зафиксирована в конце бореального и в атлантическом периоде голоцена - с 9.0 до 6.5 тыс.л.н. Уровень озера достигал отметок 91-94 м абс., что близко к современным значениям. Выше отметки 94.2 м средний многолетний уровень озера в голоцене не поднимался. В интервале 6.5-2.4 т.л.н. установлены слабые регрессивные фазы в динамике среднего многолетнего уровня. Уровень озера был ниже современного примерно на 1-3 м. Начиная с 2.4 т.л.н. уровень озера Неро медленно повышался, достигнув современных отметок примерно 300-500 л.н.

4. Обсуждение и заключение

Согласно наиболее распространенным представлениям, уровень озер в центральной части ВЕР напрямую связан со степенью увлажнения климата: более засушливые стадии соответствуют низкому уровню, а более влажные - высокому (Harrison et al., 1996; Wohlfarth et al., 2006). Однако приведенные выше результаты по истории озер Неро и Селигер нельзя объяснить исключительно изменениями влажности климата. Изменения уровней озер плохо согласуются с ходом изменений осадков. Аналогичные тенденции изменения уровней установлены для ряда озер северо-восточной Германии и Швеции (Theuerkauf et al., 2022; Digerfeldt et al., 2013): глубокая регрессия в конце позднеледниковья и начале голоцена, интенсивный подъем уровня в середине голоцена, стабилизация (с небольшим восходящим трендом) в позднем голоцене.

Анализ рельефа и строения отложений на участках стока из озер Неро и Селигер (реки Векса и Селижаровка, соответственно) показывает, что высота порога стока контролируется, прежде всего, аллювиальной аккумуляцией (или эрозией) в руслах крупных боковых притоков - реки Устье-Которосль и Крапивенка. Внутренние дельты этих рек образуют аллювиальную дамбу, которая поддерживает современный относительно высокий уровень озер. Так, русловая система Устья-Которосли на участке впадения Вексы находится в режиме интенсивной аккумуляции и роста высоты дна, о чем свидетельствует крайне частое меандрирование и обвалованный характер русел. До строительства плотины в Белогостицах во время крупных паводков на Устье-Которосли даже отмечались обратные уклоны по Вексе (Бикбулатов и др., 2003), что приводило к

противотоку воды и наводнениям на озере Неро. Все это указывает на прямую зависимость уровня Неро от эрозионно-аккумулятивного режима в системе рек Устье-Которосль.

Кривые колебаний уровня озер Неро и Селигер (Константинов и др., 2021; Константинов и др., 2023) обнаруживает тесную связь с диаграммой интенсивности флювиальных процессов (Panin and Matlakhova, 2015). Крупная регрессия озер в позднеледниковье и начале голоцена была вызвана экстремально высокими расходами воды и глубоким врезаем речных русел в регионе. Следствием этого стало существенное падение высоты порога стока озер. Так, озеро Неро фактически не существовало в раннем голоцене, оно выглядело как небольшое озеровидное расширение в месте слияния рек Сары и Ишни. Повышение уровня озер в атлантический период совпадает с минимумом речного стока в голоцене, что создало предпосылки для интенсивной аллювиальной аккумуляции на участках русел с низкими уклонами продольного профиля. Это привело к созданию аллювиальных дамб, подпрудивших низовья рек Сары и Ишни (в случае Неро) и Селижаровки (в случае Селигера). Дальнейшая стабилизация уровня озер с небольшим трендом к росту согласуется со снижением амплитуды флювиальной динамики. Так как выявленный механизм колебания уровня озер имеет региональную обусловленность, то озера с похожей историей могут быть распространены довольно широко в Центральной и Восточной Европе.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания FMWS-2024-0003 «Реконструкция природных событий прошлого на территории России по данным изучения седиментационных палеоархивов».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Digerfeldt G., Björck S., Hammarlund D. et al. 2013. Reconstruction of Holocene lake-level changes in Lake Igeljön, southern Sweden. *GFF* 135(2): 162-170. DOI: [10.1080/11035897.2013.799514](https://doi.org/10.1080/11035897.2013.799514)
- Harrison S.P., Yu G.E., Tarasov P.E. 1996. Late Quaternary lake-level record from northern Eurasia. *Quaternary research* 45(2): 138-159. DOI: [10.1006/qres.1996.0016](https://doi.org/10.1006/qres.1996.0016)
- Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena* 130: 46-61. DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)
- Theuerkauf M., Blume T., Brauer A. et al. 2022. Holocene lake-level evolution of Lake Tiefer See, NE Germany, caused by climate and land cover changes. *Boreas* 51(2): 299-316. DOI: [10.1111/bor.12561](https://doi.org/10.1111/bor.12561)
- Wohlfarth B., Tarasov P., Bennike O. et al. 2006. Late glacial and Holocene palaeoenvironmental changes in the Rostov-Yaroslavl'area, West Central Russia. *Journal of Paleolimnology* 35: 543-569. DOI: [10.1007/s10933-005-3240-4](https://doi.org/10.1007/s10933-005-3240-4)
- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С. и др. 2003. Гидрология и гидрохимия озера Неро. 192 с.
- Константинов Е.А., Карпухина Н.В., Захаров А.Л. и др. 2023. Колебания уровня озера Неро в голоцене. *Геоморфология и палеогеография* 54(2): 51-60. DOI: [10.31857/S2949178923020044](https://doi.org/10.31857/S2949178923020044)
- Константинов Е.А., Панин А.В., Карпухина Н.В. и др. 2021. Речное прошлое озера Селигер. *Водные ресурсы* 48(5): 481-491. DOI: [10.31857/S0321059621050114](https://doi.org/10.31857/S0321059621050114)

The Holocene evolution of floodplain mire geosystems in the southeastern part of the Meshchera lowlands



Mazei N.G.^{1,2,*}, Shatunov A.E.^{1,2}, Novenko E.Yu.^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

²Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 29 Staromonetny Lane, building 4, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The results of paleoecological studies of peat deposits in the area of the southeastern part of the Meshchera lowlands (Mostovoye mire) based on the analyses of peat properties, plant macrofossils, charcoal, pollen and radiocarbon dating are presented. The mire was formed in the oxbow depression on the floodplain of the Goose River around 9480 cal. yr. BP and was eutrophic throughout most of the Holocene. Drastic changes in the dynamics of the mire, namely its transition to the mesotrophic stage, characterized by a decrease in the degree of peat decomposition, occurred about 70 years ago. The results of the pollen analysis show the existence of birch-pine forests in combination with shrub thickets formed by *Betula nana* in the period 9480-8750 cal. yr. BP. In the subsequent stages, the vegetation cover turned to a combination of broad-leaved, birch-pine forests and riverine forests with alder. Frequent fires, both natural and anthropogenic, have favored the development of birch and pine forests over the last millennium.

Keywords: Meshchera lowlands, Holocene, peatland, vegetation dynamics, plant macrofossils, pollen analysis

For citation: Mazei N.G., Shatunov A.E., Novenko E.Yu. The Holocene evolution of floodplain mire geosystems in the southeastern part of the Meshchera lowlands // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 434-439. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-434

1. Introduction

Peatlands play a key role in storing carbon and influencing the levels of greenhouse gases in the atmosphere. The study of vegetation dynamics, peatland initiation and development during the Holocene is of great importance in order to propose appropriate tools for environmental management in a changing climate. Peatlands and forested mires cover 30-35% of the area of the Meshchera lowlands (Dyakov et al., 2020). It's therefore important to understand the patterns and mechanisms of the long-term evolution of peatland landscapes dominated by carbon sink geosystems.

2. Materials and Methods

The study area is located in the Klepikovskiy district of the Ryazan region in the southeastern part of the Meshchera lowlands in the vicinity of the Lesunovo village. The relief includes slightly undulating plains with absolute heights of 110–125 m a.s.l., composed of moraine deposits of the Don glaciation, overlain by a thick layer of fluvio-glacial sands (up to 4 m). The

climate is temperate continental. The moisture index is between 1.2 and 1.4, which, together with the flat, slightly undulating topography of the plain, determines the high proportion of peatland in the landscape. The vegetation cover of the region is dominated by pine forests.

Peat cores from Mostovoye bog were subsampled for analysis at 3 cm sampling intervals. Radiocarbon dating, bulk density and loss-on-ignition (GOST 28245-89) measurements, pollen analysis (Moore et al., 1991) and plant macrofossils analysis (Dombrovskaya et al., 1959) were carried out. Radiocarbon dating of the samples was conducted at the Institute of Environmental Management of the National Academy of Sciences of Belarus. The model of peat accumulation was constructed using the package Bacon in the R software environment.

3. Results and Discussion

The Mostovoye mesotrophic mire is located on the floodplain of the Goose River in an ancient oxbow depression. The total area of the mire is 4.8 hectares.

*Corresponding author.

E-mail address: natashamazei@mail.ru (N.G. Mazei)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



The peat deposit (120 cm deep) is underlain by lacustrine sediments, with medium and fine-grained gley sands underneath.

The accumulation of lacustrine sediments with high organic matter content began in the Mostovoye mire around 9480 cal. yr. BP. At the initial stage (9480 to 8950 cal. yr. BP), there was a shallow overgrowing lake (Fig.1) marked by indicator species such as *Stratiotes aloides* and *Nymphaea* sp. surrounded by birch-pine forests with Poaceae and Cyperaceae in herbaceous layer. Up to 10% of *Betula nana* pollen in assemblages indicates a presence of shrub plant communities.

Final oxbow shallowing and peat inception occurred at 8950 cal. yr. BP, indicated by a sharp increase in LOI. (Fig. 1).

In the period 8750–6850 cal. yr. BP (depth 118–100 cm), the local vegetation was dominated by *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Menyanthes trifoliata* and other grasses, with a low proportion of feather mosses, indicating the eutrophic stage of peatland development. The composition of the pollen assemblages suggests that broad-leaved forests were spreading across the surrounding landscape (*Quercus*, *Tilia*, *Ulmus* contributed up to 10–15% of the pollen assemblages).

In the period 6850–6300 cal. yr. BP (100–95 cm) peat consists (up to 95%) of woody residues (*Betula* sp., *Alnus* sp., *Pinus* sp.), which is probably due to fires, as the peaks of wood remains coincide with charcoal particles in the peat layers.

In the period 6300–3800 cal. yr. BP (depth 95–76 cm), changes in the climate and the water regime of the floodplain led to the flooding of the peat bog. The proportion of different *Sphagnum* moss species in the peat increased (up to 30%), while the proportion of sedges decreased slightly. A rise in the amount of *Alnus* pollen (up to 20%) indicates the predominance of riverine forests around the mire. Broad-leaved forests with an admixture of pine and birch were widespread in the watersheds.

During the next phase, from 3800 to 2200 cal. yr. BP (depth 76–64 cm), the mire was periodically burned and a woody birch peat was formed. *Pinus*, *Betula*, *Tilia* and *Quercus* formed the terrestrial forests, while the

spruce gradually increased its abundance.

The period of 2200–1100 cal. yr. BP (depth 64–52 cm) is characterized by increasing of peatland moisture. A significant amount of *Alnus* pollen indicates the spread of floodplain forests. The occurrence of *Sphagnum subsecundum*, *Sphagnum* sp. with admixtures of *Eriophorum* sp., *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *C. sp.* in the peat indicates the formation of a sedge-sphagnum fen.

At a depth of 50–47 cm (985–810 cal. yr. BP) a layer of birch peat with a wood residue content of up to 65% was found. A high abundance of macroscopic charcoal particles was also observed in this layer, that may indicate a large fire with a significant area and impact. A series of charcoal layers in peat in this interval can be interpreted as either controlled burning of forests or as fires in already human fragmented forests. The proportion of *Artemisia*, Poacea, Cerealia pollen and anthropogenic indicator species in the pollen assemblages increases sharply. Drastic changes in peat-forming plants, such as the expansion of woody vegetation into the peatland, also indicate significant changes in the local environmental conditions and surface wetness (obviously, the Medieval climatic optimum).

In the period from 810 cal. yr. BP to mid XXth century AD (depth 47–27 cm), the mire was characterized by eutrophic conditions. Highly decomposed sedge peat occurred with an increasing amount of *Carex* and the remains of *Betula* sp.

At a depth of 36 cm, a very sharp boundary in the peat sequences was recorded, which appeared as sharp changes in the colour of the peat and its degree of decomposition. This boundary is marked by a 0.2 cm layer of charcoal. Radiocarbon dating for the charcoal layer indicates its formation after 1950 AD (approximately 70 years ago).

The upper peat horizon at a depth of 36–27 cm is represented by slightly decomposed sedge peat (*Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Eriophorum*), with small inclusions of birch bark.

The uppermost 27 cm of the peat core is represented by loose, watered mesotrophic *Sphagnum* peat (*Sphagnum majus*, *S. fallax*) with a low content of

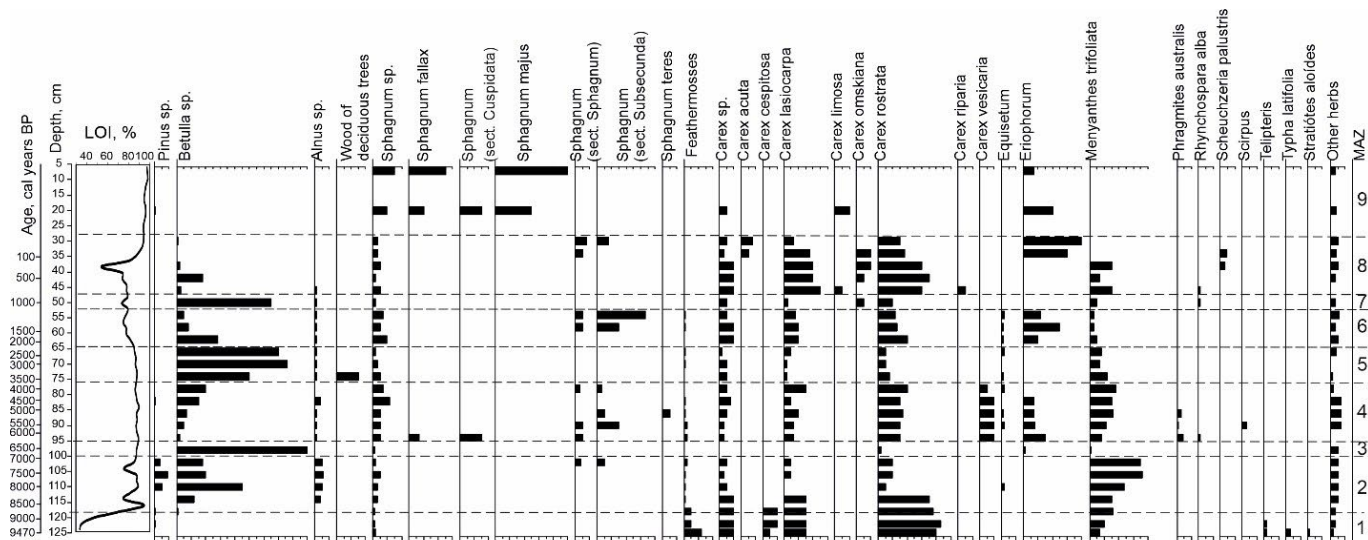


Fig.1. Diagram of the plant macrofossils composition and loss-on-ignition (LOI) of the peat core from the Mostovoye mire.

Eriophorum (7%). The area around the mire was occupied by *Pinus-Betula* forests, with some *Alnus* and a small amount of *Picea*.

4. Conclusions

1. The evolution of the Mostovoye mire in the Holocene was determined both by specific hydrological and geomorphological factors, as well as by the processes of peatland self-development and accumulation of peat. According to the data obtained, the transition of the peatland from an oxbow lake to a fen was detected at 8950 cal. yr. BP. The fen-bog transition occurred only ca. 70 years ago.
2. In the period 9480–8750 cal. yr. BP regional vegetation was represented by a mosaic of birch-pine forests with shrub thickets of *Betula nana*. In the following stages, the vegetation cover consisted of different combinations of deciduous broad-leaved and pine forests and riverine woodlands with alder.

Acknowledgements

The study was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project No. 24-27-00096).

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests.

References

- GOST 28245-89. 1990. Peat. Methods for determining the botanical composition and degree of decomposition. Moscow.
- Dombrovskaya A.V., Koreneva M.M., Prison S.N. 1959. Atlas of plant residues found in peat. Moscow: State Energy Publishing House.
- Dyakonov K.N., Novenko E.Y., Mazei N.G. et al. 2020. The age of peatlands and peatland formation stages in plesie landscapes of the East European Plain. *Doklady Earth Sciences* 492(2): 464–470.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. *Pollen Analysis*. Blackwell, Oxford.

Эволюции пойменных болотных геосистем юго-восточной части Мещерской низменности в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYМазей Н.Г.^{1,2,*}, Шатунов А.Е.^{1,2}, Новенко Е.Ю.^{1,2}¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д.1, Москва, 119991, Россия² Институт географии РАН, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены данные комплексных палеоэкологических исследований территории юго-восточной части Мещерской низменности. Приведены результаты изучения свойств торфяной залежи, ботанического анализа торфа, содержания прослоев угля, спорово-пыльцевого анализа и радиоуглеродного датирования разреза болота Мостовое. Полученные данные показали, что болото сформировалось в старичном понижении высокой поймы реки Гусь около 9480 кал. л.н. и на протяжении почти всего периода своего существования находилось на эвтрофной стадии развития. Резкие изменения в геосистеме болота – переход к мезотрофной стадии, уменьшение степени разложения торфа произошли около 70 лет назад. Согласно результатам палинологического анализа на исследуемой территории в период 9480–8750 кал. л.н. были распространены березово-сосновые леса в сочетании с кустарниковыми сообществами, образованными *Betula nana*, которые очевидно, были унаследованы от перигляциальной растительности. На последующих этапах растительный покров представлял собой сочетание широколиственных, берёзово-сосновых лесов и пойменных лесов с участием ольхи. Развитию березово-сосновых лесов в течение последнего тысячелетия способствовали частые пожары, обусловленные, как действием естественных причин, так и влиянием антропогенного фактора.

Ключевые слова: Мещерская низменность, голоцен, болотные геосистемы, динамика растительности, ботанический состав торфа, спорово-пыльцевой анализ

Для цитирования: Мазей Н.Г., Шатунов А.Е., Новенко Е.Ю. Эволюции пойменных болотных геосистем юго-восточной части Мещерской низменности в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 434-439. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-434

1. Введение

Исследования истории болотообразовательного процесса в Мещерской низменности, где болота и заболоченные леса охватывают значительные площади (около 30-35% территории) и занимают, как правило, субдоминантные, а иногда и доминантные урочища, в настоящее время особенно актуальны (Дьяконов и др., 2020). Болота играют ключевую роль в накоплении углерода и оказывают влияние на содержание парниковых газов в атмосфере. В условиях меняющегося климата изучение динамики растительности, возраста болот и выявление факторов, определяющих эти процессы на протяжении голоцена, приобретает большое значение для решения вопросов охраны окружающей среды и оптимизации природопользования.

2. Материалы и методы исследований

Исследуемая территория находится в Клепиковском районе Рязанской области в юго-восточной части Мещерской низменности в окрестностях деревни Лесуново. В рельефе района исследований представлены слабоволнистые равнины с абсолютными высотами 110-125 м н.у.м., сложенные моренными отложениями донского оледенения, перекрытыми мощной толщей флювиогляциальных песков (до 4 м). Климат умеренный, умеренно-континентальный. Коэффициент увлажнения – 1,2–1,4, что совместно с условиями плоского рельефа и слабой расчленённости территории определяет большую степень заболоченности региона. В растительном покрове региона преобладают сосновые леса.

Материалами для реконструкции эволюции

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: natashamazei@mail.ru (Н.Г. Мазей)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



пойменных болот послужили материалы детальных исследований болота Мостовое: радиоуглеродного датирование, определения объемного веса и зольности торфа (ГОСТ 28245-89), спорово-пыльцевой анализ (Moore et al., 1991), ботанический анализ торфа (Домбровская и др., 1959). Интервал отбора образцов составлял 3 см. Радиоуглеродное датирование образцов проведено в Институте природопользования НАН Беларуси. Модель скорости аккумуляции торфа была выполнена при помощи программы *Vacon* в программной среде R.

3. Результаты и обсуждение

Мезотрофное болото Мостовое расположено на высокой пойме реки Гусь. Общая площадь болота составляет 4,8 га. Торфяная залежь (мощностью 120 см) подстилается оторфованными старичными отложениями, ниже которых залегает песок средне- и мелкозернистый глеевый.

Судя по составу отложений и положению в рельефе, болото Мостовое начало свое развитие в старичном понижении на высокой пойме реки Гусь примерно 9480 кал. л.н. (календарных лет назад). В период с 9480 до 8950 кал. л.н. на месте современного болота существовал мелкий зарастающий водоем (рис.1), отмечены индикаторы озерной стадии: *Stratiótes aloídes*, *Nymphaéa* sp) вокруг которого произрастали березово-сосновые леса, с преобладанием в травянистом ярусе растений семейства *Roaceae*, *Cyperaceae*, отмечено до 10% пыльцы *Betula pana*.

Окончательное обмеление водоема и начало болотной стадии развития относится к рубежу 8950 кал. л., отмечается резкий рост потерь при прокаливании (рис. 1).

В период 8750-6850 кал. л.н. (глуб. 118-100 см) в локальной растительности преобладали *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Menyanthes trifoliata* и другие травы с небольшим участием зеленых мхов, что указывает на эвтрофную стадию развития болота. В спорово-пыльцевых спектрах отмечено участие широколиственных пород (*Quercus*, *Tilia*, *Ulmus*, до 10-15%), отражающее распространение широколиственных формаций в районе исследований.

В период 6850-6300 кал. л.н. (100-95 см) торф представлен остатками древесных растений (*Betula* sp., *Alnus* sp., *Pinus* sp.), их доля достигает 95% что, вероятно, обусловлено пожарами, поскольку пики их содержания совпадают со скоплениями угольков в образцах и визуально различимыми прослоями угля в торфяной колонке.

В период 6300-3800 кал. л.н. (глуб. 95-76 см) изменения климата и водного режима поймы привели к обводнению болота увеличению участия в сложении торфяной залежи различных видов *Sphagnum* (до 30%), небольшому снижению участия осок. Появление значительного количества пыльцы *Alnus* (до 20%) говорит о преобладании пойменных лесов вокруг болота. На водоразделах сохранялись широколиственные леса с участием сосны и березы.

В течение следующей фазы с 3800 до 2200 кал.

л.н. (глуб. 76-64 см) болото периодически горело, формировался древесный березовый торф. Лесные сообщества формировали сосна, береза, липа и дуб, постепенно начала увеличивать свое участие ель.

С периодом 2200-1100 кал. л.н. (глубина 64-52 см) связан новый этап увеличения влажности в болотной геосистеме. Значительное количество пыльцы *Alnus*, свидетельствует о разрастании пойменных лесов, а представленные в торфяной залежи *Sphagnum subsecundum*, *Sp. sp.*, с примесью *Eriophorum* sp., *Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *C. sp.* указывают на формирование низинного осоково-сфагнового торфа.

На глубине 50-47 см (период 985-810 кал. л.н.) выделен прослой березового торфа, в котором содержание древесных остатков составляет 65%. Здесь же отмечен и резкий всплеск макрочастиц угля, что может указывать на значительный по площади и воздействию крупный пожар, а остальные колебания макрочастиц угля на данном этапе можно интерпретировать либо как контролируемые выжигания лесов, либо как возгорания уже фрагментированных антропогенным воздействием лесных массивов. В спорово-пыльцевых спектрах резко увеличивается доля полыни, злаков и видов-антропогенных индикаторов. Наблюдаемая резкая смена растений торфообразователей указывает на существенные изменения и условий среды, распространение древесной растительности на болоте в период 1200-810 кал. л.н. (очевидно, Средневековый климатический оптимум).

В период с 810 кал. л.н. до середины XX века н.э. (глуб. 47-27 см) в болоте существовали эвтрофные условия. Формировался сильно разложившийся осоковый торф, в ботаническом составе торфа значительно увеличивается доля осок с примесью остатков *Betula* sp.

На глубине 36 см в торфяной залежи болота зафиксирована очень резкая граница, выделенная по цвету торфа и степени разложения, отделенная от вышележащих слоев прослоем угля, толщиной 0.2 см. Радиоуглеродная датировка для этого прослоя указывает на его формирование после 1950 г. н.э. (приблизительно 70 лет назад). Верхний горизонт торфа на глубине 30-36 см представлен слабо-разложившимся осоковым торфом (*Carex rostrata*, *C. lasiocarpa*, *Eriophorum*), с небольшими включениями коры березы.

Выше по разрезу степень разложения торфа уменьшается, верхние 27 см разреза представлены рыхлым, обводненным сфагновым переходным торфом (*Sphagnum majus*, *Sp. fallax*) с небольшим содержанием пушицы (7%). Окружающая болота растительность на данном этапе представлена сосново-березовыми лесами с примесью ольхи и небольшим количеством ели.

4. Выводы

1. Эволюция болота Мостовое в голоцене определялось как конкретными гидрологическими и геоморфологическими факторами, так и про-

цессами саморазвития болота и накопления торфяной залежи. Согласно полученным данным переход болотной геосистемы из стадии низинного болота в стадию переходного произошел только около 70 л. н.

2. В период 9480–8750 кал. л.н. на исследуемой территории были распространены березово-сосновые леса и ерниковые сообщества с *Betula nana*, очевидно, унаследованные от перигляциальной растительности. На последующих этапах растительный покров представлял собой различные сочетания широколиственных, березово-сосновых лесов и пойменных лесов с участием ольхи.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 24-27-00096.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- ГОСТ 28245-89. 1990. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. Москва.
- Домбровская А.В., Коренева М.М., Тюремнов С.Н. 1959. Атлас растительных остатков, встречаемых в торфе. М.: Государственное энергетическое издательство.
- Дьяконов К.Н., Новенко Е.Ю., Мазей Н.Г. и др. 2020. Возраст болот и этапы болотообразования в полесских ландшафтах Восточно-Европейской равнины. Доклады РАН. №2, С.464-470.
- Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. 1991. Pollen Analysis. Blackwell, Oxford.

Organic matter in the lacustrine sediments of the Kama-Keltma lowland (Cis-Urals): assessment of distribution and dynamics in the Late Pleistocene and Holocene



Kopytov S.V.^{1,2*}, Sannikov P.Yu.¹, Mekhonoshina E.A.¹, Solovyova E.E.¹, Samarkina A.A.¹

¹ Perm State University, Bukireva str. 15, Perm, 614990, Russia,

² Perm State Humanitarian Pedagogical University, Sibirskaya str. 24, Perm, 614990, Russia

ABSTRACT. The short communication article presents the results of analyses of the lacustrine sediments of Novozhilovo and Chelvinskoe lakes, located at the Kama-Vychevda watershed. Big set (209) of sediments samples from three wells were analyzed by the loss on ignition (550 °C) method. Age of cores and the rate of sediment accumulation were based on the 14 radiocarbon dates. Six stages of deposits accumulation and nature dynamics during the Late Glacial and Holocene in the lakes catchment area are proposed. The first stage (14.15 – 13.5 cal. kyr BP) is characterized by high rates of deposits accumulation at low values of organic matter content, indicating alluvial sedimentogenesis. Peak of accumulation rates as well as a sharp rise in bioaccumulation were observed during the second stage (13.5 – 12.4 cal. kyr BP), which is interpreted as stabilization of the lake level and external environmental conditions. During the third stage (12.4 – 10.7 cal. kyr BP), the sediment accumulation rate decreases rapidly, reaching a minimum by the end of the period. The organic matter content also decreases significantly (to 30 %). The short-term fourth period (10.7 – 10.0 cal. kyr BP) records the transition from the Late Pleistocene (dominance of rarefied periglacial vegetation) to the Early Holocene (predominance of forest communities). This is marked by a drastic increase in the loss on ignition values (up to 92-95%). During the fifth stage (10.0 – 8.8 cal. kyr BP), the sediments accumulation rate increases and the organic matter content decreases to 77-82%. Synchronously with some increase in the concentration of mineral particles. Smoothing of the loss on ignition curve (average values - 92-96%), a marked increase in the sediment accumulation rate during the sixth stage (8.8 - 5.0 cal. kyr BP) probably indicates the stabilization of external conditions in the lake catchment.

Keywords: lacustrine sedimentation, loss on ignition, Novozhilovo lake, Chelvinskoe lake, Kama-Vychevda watershed

For citation: Kopytov S.V., Sannikov P.Yu., Mekhonoshina E.A., Solovyova E.E., Samarkina A.A. Organic matter in the lacustrine sediments of the Kama-Keltma lowland (Cis-Urals): assessment of distribution and dynamics in the Late Pleistocene and Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 440-445. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-440](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-440)

1. Introduction

The paper presents the study of the lacustrine sediments of Novozhilovo and Chelvinskoe lakes, belonging to the southern part of the Kama-Keltma lowland. The aim of the research is to reconstruct the dynamics of erosion-accumulation processes within the catchments of the lakes, based on the analysis of organic matter contents by loss on ignition method.

2. Materials and methods

Lacustrine sediments were sampled in January 2023 by Livingstone corer. Two cores were obtained from the Novozhilovo lake (NZH-1, NZH-2) and one from Chelvinskoe lake (CHOL-1). The thickness of cores was 5.2 m, 2.8 m, 3.2 m, respectively.

Radiocarbon dating was carried out for samples of sapropel (9), peat (4) and wood remains (1) in the "Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron

*Corresponding author.

E-mail address: kopytov@psu.ru (S.V. Kopytov)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Microscopy” of Institute of Geography RAS (sample preparation) and in the Isotope Research Center of the University of Georgia (measurement). Among the 14 samples, 5 are from NZH-1, 8 are from NZH-2, and 1 is from CHOL-1. The age of the wood sample was determined by the AMS method. Rest samples were determined by liquid scintillation method. Radiocarbon dates were calibrated with Calib 8.10 using IntCal20. Sedimentation rates were calculated in the R (Bacon package).

For the Loss On Ignition analysis (LOI) samples of 5-10 cm³ were taken every 5 cm, a total of 209 samples were analyzed. According to the methodology (Heiri et al., 2001), the samples in porcelain crucibles were dried at 105 °C for 4 hours and then weighed. Then the samples were ignited at 550 °C for 2 hours and then weighed again. The difference between the second and the first measurement gives the value reflecting the organic matter content of the sample.

3. Results and Discussion

3.1. Calibrated age of sediments and accumulation rate

Deposits of the deepest (6.6-8.2 m) part of the NZH-1 core were formed in the interval 14.15 – 10.1 cal. kyr BP. Sediment accumulation rates decrease stepwise from older deposits (1.2-1.3 mm/year) to younger ones (0.7-0.8 mm/year).

Dated sediments of the NZH-2 well refer to the time of 10.0 – 5.15 cal. kyr BP. The rate of sediment accumulation changed nonlinearly. From 10.0 to 8.5 cal. kyr BP the accumulation rate drops from 1.0 to 0.5-0.6 mm/year. After that (8.5-5.0 cal. kyr BP) there is a wave-like increase in accumulation rates to 1.5-1.8 mm/year.

The beginning of sedimentogenesis in the CHOL-1 core dates back to the Early Holocene – 9.05 cal. kyr BP.

3.2. Organic matter content

In the deepest sediment layers (5.25-5.0 m) from borehole NZH-2, minimum values of LOI at 10% were observed. Following this, at depths of 5.0-4.85 m, a sharp increase in organic content up to 85% was detected. All overlying layers (4.85-2.5 m) are characterized by smooth dynamics of LOI values, which are kept near 96%.

In the basal layers (6.1-5.95 m) of the CHOL-1 core, the LOI values increase from 10% to 45%. In the depth interval 5.95-5.8 m, the organic matter content slowly increases from 82 to 90%. Further (5.8-3.15 m), the organic matter content remains relatively stable about 96%.

In NZH-1 core, after the well-expected rapid increase of LOI in the basal layers (8.2-7.6 m) from 10-20% to 80-85%. Further (7.6-7.0 m) there is a sharp fall in organic matter content until 20-40%. In the overlying layer of 7.0-6.6 m the values of LOI increase to

92-95% again. Then, at depths of 7.6-5.7 m, there follows a prolonged decline in organic matter content to 77-82%. The upper layers (5.7-3.0 m) are characterized by a quite uniform organic matter content of about 93%.

Based on the dating of sediments, as well as on the obtained values of organic matter content, a preliminary identification of six stages of sedimentation in Novozhilovo and Chelvinskoe lakes was carried out.

The first stage - 14.15 – 13.5 cal. kyr BP corresponds to the first half of the Boelling-Allerød interstadial. Comparatively low organic matter content of 10-21% indicates lacustrine-alluvial conditions. Active erosion in the catchment causes high rates of sediment accumulation in the lakes.

The second stage - 13.5 – 12.4 cal. kyr BP occurs in the second half of the Bølling-Allerød, when sparse coniferous and small-leaved forests interspersed with steppe and tundra communities up to 60° N assumed by Markova (2006). Active erosion is ending in the catchment area of the lakes. The rate of sediment accumulation, having reached its peak, and begins to slowly decrease after. The level of the lake stabilizes, the rate of organogenic sedimentation increases, and it begins to dominate over mineralogenic sedimentation.

The third stage – 12.4 – 10.7 cal. kyr BP. The stage corresponds to the Late Dryas – the time of dominance of open periglacial-type ecosystems (Zelikson, 1994). Sedimentation rates continue to decrease and fall to the 0.7-0.8 mm/year by the end of the phase. It is characterized by a sharp decrease in LOI values to an - 30%. The intensity of biogenic sedimentation drops significantly, and the sediment formed becomes organomineral again, with a slight predominance of the inorganic part.

The fourth stage – 10.7 – 10.0 cal. kyr BP. The time of transition to the early Holocene, associated with the change of open periglacial landscapes to forest communities (Paleoclimates and Paleolandscapes, 2009). Organic matter content increases rapidly to 92-95%. Organogenic sedimentation again begins to dominate noticeably.

The fifth stage – 10.0 – 8.8 cal. kyr BP. Early Holocene. It is fixed in all three cores. There is a decrease in the LOI values to 77-82%. At the same time, sediment accumulation rates begin to increase slightly due to additional mineral influx. The combination of these two features is presumably explained by the previously described (Lapteva et al., 2023) relatively short period of increased spring discharge of the Kama River and deposition of particulate matter during floods.

The sixth stage – 8.8 – 5.0 cal. kyr BP. Middle Holocene. Organogenic accumulation begins to strongly dominate over mineralogenic accumulation again. Moreover, the rate of organic matter accumulation wave-like increases from 0.5-0.6 mm/year to 1.6-1.8 mm/year. LOI values increase up to 92-96%, the curve of organic matter content is noticeably smoothed. Stabilization of the condition within the catchment occurs.

4. Conclusions

Based on the organic matter content and sediments accumulation rates of cores obtained from Novozhilovo and Chelvinskoe lakes, a preliminary periodization of sedimentation and dynamics of the environment during the Late Glacial and Holocene is proposed. Six stages have been identified. Three of them (second half of the Bølling-Allerød, Early and Middle Holocene) are characterized by increased accumulation of biogenic material; three rest stages (first half of the Bølling-Allerød, Younger Dryas and first half of the Holocene) are characterized by decreased organic matter content.

Acknowledgements

The study was funded by the Russian Science Foundation, project No. 23-68-10023, <https://rscf.ru/project/23-68-10023/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25: 101–110. [10.1023/A:1008119611481](https://doi.org/10.1023/A:1008119611481)
- Lapteva E.G., Zaretskaya N.E., Lychagina E.L. et al. 2023. Holocene vegetation dynamics, river valley evolution and human settlement of the upper Kama valley, Ural region, Russia. *Vegetation History and Archaeobotany.* 32: 361–385. [10.1007/s00334-023-00913-5](https://doi.org/10.1007/s00334-023-00913-5)
- Markova A.K., Kolfshoten T., Simakova A.N. et al. 2006. Ecosystems of Europe during the period of the Late Glacial warming of Bølling-Allerød (10.9–12.4 thousand years ago) according to palynological and theriological data. *Izvestia RAS. Ser. Geograph.* 1: 15–25.
- Paleoclimates and paleolandscapes of the extratropical space of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene - Holocene. Atlas-monograph. 2009. In: Velichko A.A. et al. (Ed.). Moscow: GEOS.
- Zelikson E.M. 1994. To characterize the vegetation of Europe in Allerød. Short-period and abrupt landscape-climatic changes over the last 15,000 years. Moscow, IG RAS, pp. 113–125.

Органическое вещество в донных отложениях озер Камско-Кельтминской низменности (Предуралье): оценка распределения и динамика в позднем плейстоцене и голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYКопытов С.В.^{1,2*}, Санников П.Ю.¹, Мехоношина Е.А.¹,
Соловьева Е.Е.¹, Самаркина А.А.¹¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, г. Пермь, 614990, Россия² Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, ул. Сибирская, 24, г. Пермь, 614990, Россия

АННОТАЦИЯ. В сообщении приводятся результаты анализа отложений озер Новожилово и Челвинское, расположенных на водоразделе Камы и Вычегды. Вскрытые тремя скважинами седиментационные комплексы проанализированы методом потерь при прокаливании (550 °С) – всего 209 образцов. Данные о возрасте отложений и скорости накопления вещества получены на основе серии 14 радиоуглеродных датировок. Предложено выделение шести этапов накопления осадков и динамики природной обстановки в течение позднеледниковья и голоцена на водосборе озер. Первая стадия (14,15 – 13,5 тыс. кал. л.н.) характеризуется высокими скоростями накопления осадка при низких значениях содержания органического вещества, что указывает на аллювиальный седиментогенез. Пик темпов аккумуляции, а также резкий скачок биогенной аккумуляции отмечены во время второй стадии (13,5 – 12,4 тыс. кал. л.н.), что интерпретируется как стабилизация уровня водоема и внешних условий среды. Во время третьего этапа (12,4 – 10,7 тыс. кал. л.н.) скорость накопления осадка быстро снижается, достигая минимума к концу периода. Заметно (до 30%) снижается и содержание органического вещества. Скоротечный четвертый период осадконакопления (10,7 – 10,0 тыс. кал. л.н.) фиксирует переход от позднего плейстоцена (господство разреженной перигляциальной растительности) к раннему голоцену (доминирование лесных сообществ). Это отмечается по резкому росту значений потерь при прокаливании (до 92-95%). В течение пятой стадии (10,0 – 8,8 тыс. кал. л.н.) темпы аккумуляции растут, а содержание органических веществ снижается до 77-82%, параллельно с некоторым ростом концентрации минеральных частиц. Сглаживание кривой потерь при прокаливании со средними значениями 92-96%, заметный рост скорости накопления осадка во время шестой стадии (8,8 – 5,0 тыс. кал. л.н.), вероятно, указывает на стабилизацию внешних условий на водосборе озер.

Ключевые слова: озерное осадконакопление, потери при прокаливании, озеро Новожилово, озеро Чёлвинское, Камско-Вычегодский водораздел

Для цитирования: Копытов С.В., Санников П.Ю., Мехоношина Е.А., Соловьева Е.Е., Самаркина А.А. Органическое вещество в донных отложениях озер Камско-Кельтминской низменности (Предуралье): оценка распределения и динамика в позднем плейстоцене и голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 440-445. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-440

1. Введение

В этом сообщении приводятся результаты исследования донных отложений озер Новожилово и Челвинское, относящихся к южной части Камско-Кельтминской низменности. Цель работы – реконструкция динамики эрозионно-аккумулятивных процессов в пределах водосборов озер, на основе

анализа содержания органического вещества в осадке методом потерь при прокаливании.

2. Материалы и методы

Озерные отложения были отобраны в январе 2023 г. буром Ливингстона. Пробурено две колонки на оз. Новожилово (NZH-1, NZH-2) и одна на оз.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: kopytov@psu.ru (С.В. Копытов)

Поступила: 11 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Челвинском (CHOL-1). Мощность вскрытых отложений составила 5,2 м, 2,8 м, 3,2 м, соответственно.

Радиоуглеродное датирование проведено для образцов сапропеля (9), торфа (4) и остатков древесины (1) в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГРАН (пробоподготовка) и в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (измерение). Из 14 образцов 5 относятся к NZH-1, 8 – к NZH-2, 1 – CHOL-1. Возраст образца древесины определялся методом AMS, остальные образцы – жидкостно-сцинтилляционным. Радиоуглеродные даты калиброваны при помощи Calib 8.10 с использованием IntCal20. Темпы осадконакопления рассчитаны в среде R (пакет Bacon).

Для анализа на потери при прокаливании (далее – ППП) образцы объемом 5-10 см³ отбирались через каждый 5 см, всего проанализировано 209 образцов. Согласно методике (Heiri et al., 2001) образцы в фарфоровых тиглях сушились при температуре 105°C в течение 4 часов, а затем взвешивались. Далее образцы прокаливались при температуре 550°C в течение 2 часов, и затем взвешивались вновь. Разница между вторым и первым измерением дает искомую величину, отражающую содержание органического вещества в образце.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Калиброванный возраст отложений и скорость их аккумуляции

Отложения наиболее глубокой (6,6–8,2 м) части колонки NZH-1 сформированы в интервале 14,15–10,1 тыс. кал. л.н. Темпы осадконакопления ступенчато снижаются от более древних отложений (1,2-1,3 мм/год) к более молодым (0,7-0,8 мм/год).

Датированные отложения скважины NZH-2 относятся ко времени 10,0-5,15 тыс. кал. л.н. Темпы аккумуляции осадков менялись нелинейно. С 10,0 до 8,5 тыс. кал. л.н. скорость накопления падает с 1,0 до 0,5-0,6 мм/год. После чего (8,5-5,0 тыс. кал. л.н.) происходит волнообразный увеличение темпов аккумуляции до 1,5-1,8 мм/год.

Начало озерного седиментогенеза в отложениях колонки CHOL-1 относится к раннему голоцену – 9,05 тыс. кал. л.н.

3.2. Содержание органического вещества

В наиболее глубоких слоях отложений (5,25-5,0 м) из скважины NZH-2 отмечены минимальные значения ППП на уровне 10%. Вслед за этим, на глубинах 5,0-4,85 м, наблюдается резкий рост содержания органики до 85%. Все вышележащие слои (4,85-2,5 м) характеризуются монотонной динамикой значений ППП, которые остаются на уровне 96%.

В базальных слоях (6,1-5,95 м) отложений скважины CHOL-1 значения ППП растут с 10% до 45%. В интервале глубин 5,95-5,8 м содержание органических веществ медленно растет с 82 до

90%. Далее (5,8-3,15 м) содержание органических веществ остается сравнительно постоянным со средним значением около 96%.

В колонке NZH-1, после ожидаемого быстрого роста ППП от базальной части (8,2-7,6 м) с 10-20% до 80-85%, далее (7,6-7,0 м) происходит резкое падение содержания органического вещества 20-40%. В вышележащем слое 7,0-6,6 м значения ППП вновь возрастают до 92-95%. Далее на глубинах 7,6-5,7 м следует продолжительный спад содержания органических веществ до 77-82%. Остальные слои вплоть до придонного (5,7-3,0 м) характеризуются достаточно равномерным содержанием органических веществ около 93%.

Опираясь на датировку отложений, а также на полученные значения содержания органических веществ, проведено предварительное выделение шести стадий органогенного осадконакопления в озерах Новожилово и Челвинское.

Первая стадия – 14,15-13,5 тыс. кал. л.н. Соответствует первой половине межстадиала бёллинг-аллерёд. Сравнительно низкая доля органического вещества 10-21% указывает на озерно-аллювиальные условия. Активный размыв отложений на водосборе озера обуславливает высокие темпы накопления осадка.

Вторая стадия – 13,5-12,4 тыс. кал. л.н. Охватывает вторую половину периода бёллинг-аллерёд, когда вплоть до 60⁰ с.ш. предполагается (Маркова и др., 2006) продвижение разреженных хвойных и мелколиственных лесов, перемежающихся со степными и тундровыми сообществами. На водосборе озер завершается активная эрозия. Скорость аккумуляции отложений, достигнув пика, начинает медленно снижаться. Уровень водоемов стабилизируется, темпы органогенной седиментации увеличиваются, и она начинает преобладать над минеральной.

Третья стадия – 12,4-10,7 тыс. кал. л.н. Стадия приходится на поздний дриас – время господства открытых экосистем перигляциального типа (Зеликсон, 1994). Темпы осадконакопления продолжают снижаться и к концу стадии достигают уровня 0,7-0,8 мм/год. Стадия характеризуется резким снижением значений ППП до среднего уровня в 30%. Интенсивность биогенной седиментации существенно падает, формируемый осадок вновь становится органо-минеральным, с легким преобладанием неорганической части.

Четвертая стадия – 10,7-10,0 тыс. кал. л.н. Время перехода к раннему голоцену, сопряженное со сменой открытых перигляциальных ландшафтов на лесные (Палеоклиматы и палеоландшафты, 2009). Содержание органических веществ резко возрастает до 92-95%. Органогенное осадконакопление вновь начинает заметно преобладать.

Пятая стадия – 10,0-8,8 тыс. кал. л.н. Ранний голоцен. Фиксируется уже во всех трех колонках. Отмечается снижение значений ППП до 77-82%. При этом темпы накопления осадка начинают немного расти за счет дополнительного привноса минеральных веществ. Сочетание этих двух обстоя-

тельств, предположительно, объясняется ранее описанным (Lapteva et al., 2023) относительно кратким периодом повышения весенних расходов Камы и оседанием твердых частиц во время половодий.

Шестая стадия – 8,8-5,0 тыс. кал. л.н. Средний голоцен. Органогенное накопление вновь начинает сильно преобладать над минерагенным. Причем скорость накопления органического вещества волнообразно растет с 0,5-0,6 мм/год до 1,6-1,8 мм/год. Значения ППП возрастают до 92-96%, кривая содержания органического вещества заметно сглаживается. Происходит стабилизация условий в пределах водосбора.

4. Заключение

На основе данных о содержании органического вещества и темпов аккумуляции отложений, вскрытых скважинами в озерах Новожилово и Чёлвинское, предложена предварительная периодизация осадконакопления и динамики природной обстановки в течение позднеледниковья и голоцена на их водосборах. Выделено шесть стадий, из которых три (вторая половина бёллинг-аллерёд, начало и середина голоцена) характеризуются повышенным накоплением биогенного материала; три стадии (первая половина бёллинг-аллерёд, поздний дриас и первая половина голоцена) со снижением содержания органического вещества.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-68-10023, <https://rscf.ru/project/23-68-10023/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Зеликсон Э.М. К характеристике растительности Европы в Аллерёде. 1994. Короткопериодные и резкие ландшафтно-климатические изменения за последние 15000 лет. М.: ИГ РАН, С. 113–125.

Маркова А.К., Кольфсхотен Т., Симакова А.Н. и др. 2006. Экосистемы Европы в период позднеледникового потепления бёллинг-аллерёд (10,9–12,4 тыс. лет назад) по палинологическим и териологическим данным. Известия РАН. Сер. Геогр. 1: 15–25.

Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен - голоцен. Атлас-монография. 2009. В: Величко А.А. и др. (ред.) Москва: ГЕОС, 119 с.

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. 2001. *J. Paleolimnol.* 25: 101–110. [10.1023/A:1008119611481](https://doi.org/10.1023/A:1008119611481)

Lapteva E.G., Zaretskaya N.E., Lychagina E.L. et al. 2023. Holocene vegetation dynamics, river valley evolution and human settlement of the upper Kama valley, Ural region, Russia *Vegetation History and Archaeobotany.* 32: 361–385. [10.1007/s00334-023-00913-5](https://doi.org/10.1007/s00334-023-00913-5)

Holocene vegetation dynamics of the Yamal Peninsula based on palaeobotanical data from relict peat bog deposits



Korona O.M.¹, Trofimova S.S.¹, Zhilich S.V.², Lapteva E.G.^{1*}

¹Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. 8 Marta, 202, Yekaterinburg, 620144, Russia

²Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentyev prospect, 17, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. We have performed a comprehensive paleoecological study of the peat bog deposits from six localities of the Seyakha, Yuribey and Khadytayakha rivers in the subarctic tundra zone on the Yamal Peninsula. Radiocarbon dating, as well as pollen and plant macrofossil analyses were used to track the chronological changes of the plant communities on the peninsula along the North-South transect in the Late Glacial and Postglacial periods. It was found that open woodland with tree birch and spruce existed in the Yuribey river valley during the Bølling-Allerød interstadial (between 14.7 and 12.7 cal. ka BP). Shrub tundra with *Betula nana* was widespread in this area during the Younger Dryas, between 12.6 and 11.7 cal. ka BP, under climatic conditions similar to modern ones. The spread of arboreal species (*Betula* sect. *Betula*, *Picea obovata*, *Larix sibirica*) and associated boreal herbaceous plants began later (between 10.2 and 9.7 cal. ka BP) as climatic conditions improved. The most favorable conditions for tree birch and larch existed in the Seyakha river valley between 10.2 and 8.7 cal. ka BP, whereas the best conditions for the same species and spruce in the Yuribey river valley were observed between 10.2 and 4.4 cal. ka BP. It was much warmer than it is today, and open woodland or even closed forests were widespread. Forest degradation and spread of open landscapes with tundra communities occurred in the Seyakha river valley after 8.7–8.5 cal. ka BP and in the Yuribey river valley after 4.7–4.3 cal. ka BP. Climatic conditions became similar to modern ones. Today, arboreal species grow in the Khadytayakha river valley, forming extrazonal forest communities in the subarctic tundra zones.

Keywords: paleoecology, pollen, plant macrofossils, north of Siberian Plain, Bølling–Allerød interstadial, Younger Dryas, Holocene

For citation: Korona O.M., Trofimova S.S., Zhilich S.V., Lapteva E.G. Holocene vegetation dynamics of the Yamal Peninsula based on palaeobotanical data from relict peat bog deposits // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 446–451. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-446

1. Introduction

The Yamal Peninsula is an Arctic region that has been actively studied paleoecologically for many decades. Substantial amount of data has been collected on the dynamics of the Yamal vegetation during the Holocene based on palynological studies, analyses of plant macrofossils and subfossil wood. However, not all materials are suitable for paleoecological reconstructions. Plant communities and their dynamics at the end of the Late Pleistocene are poorly documented. In this paper, we reconstruct the dynamics of the Yamal plant communities along the North-South transect during the

Late Glacial and Holocene based on pollen and plant macrofossil analyses of relict peat bog deposits.

2. Materials and methods

Paleoecological reconstructions are based on pollen, plant macrofossil, and radiocarbon data obtained from six sections of the peat bog deposits. These were studied in the basins of the Seyakha (~70° N; Lapteva et al., 2024), Yuribey (~68.5° N; Korona et al., 2014), and Khadytayakha (~67.5° N; Panova et al., 2010) rivers. Pollen and plant macrofossil analyses followed

*Corresponding author.

E-mail address: lapteva@ipae.uran.ru (E.G. Lapteva)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



standard methods (Nikitin, 1969; Faegri and Iversen, 1975). We use calibrated radiocarbon ages expressed as age ranges at 2σ (see references for original radiocarbon dates).

3. Results

Palaeobotanical analysis revealed two groups of pollen spectra and plant macrofossil assemblages typical of the period from 14.7 to 4.2 cal ka BP. Paleofloras of the first group are dominated by pollen and macrofossils of dwarf birch (*Betula nana*) and willow (*Salix* sp.) with some participation of hypoarctic shrubs (Ericales), sagebrush (*Artemisia*), species of sedge (Cyperaceae), wild grasses (Poaceae), and tundra forbs. The second group includes paleofloras with high pollen content, abundance or sporadic occurrence of vegetative parts, fruits, and seeds of arboreal plants (*Betula* sect. *Betula*, *Larix*, *Picea obovata*).

4. Discussion

The most ancient plant macrofossil assemblages containing seeds of tree birch (*Betula* sect. *Betula*) and fragments of spruce (*Picea* sp.) needles were obtained from the Yuribey river valley deposits. The age of the assemblages has been established by two AMS ^{14}C dates (14810–14150 and 13070–12720 cal. BP) which correspond to the Bølling–Allerød Interstadial (14.7–12.7 cal ka BP) (Korona et al., 2014). No pollen data are available. Open birch and birch-spruce woodlands of the forest-tundra type with dwarf birch and wet meadow vegetation were typical of the area during that period.

The pollen spectra and the macrofossil assemblage are dominated by dwarf birch, willow, sedge, including *Carex* spp. and *Eriophorum* sp., grasses, Rosaceae, including *Potentilla* sp. and *Rubus chamaemorus*, *Artemisia*, Polygonaceae, Ranunculaceae. These were obtained from the deposits of the first terrace of the Yuribey river. Their age is confirmed by the ^{14}C date of 12.6–11.9 cal ka BP, which correlates with the Younger Dryas (12.7–11.7 cal ka BP). The total content of arboreal pollen in the pollen spectra is less than 15%; arboreal macrofossils are absent. During that time, shrub tundra of dwarf birch with some participation of willow and species of sedges, grasses, and tundra forbs was dominant. Sagebrush grew in the areas with unformed turf cover. Today, *Artemisia tilesii* is widespread on alluvial slopes and in areas with disturbed soil cover in the Yuribey river valley (Rebristaya, 2013).

Wide distribution of open birch woodland occurred between 10.2 and 8.7 cal ka BP, which corresponds to the Greenlandian stage (11.7–8.2 cal ka BP) of the Holocene. This is confirmed by an increase in the abundance of pollen (20–30%) and numerous finds of *Betula* sect. *Betula* macrofossils in the deposits of the Seyakha and Yuribey rivers. Dated finds of subfossil birch wood from different locations on the Yamal peninsula also correspond to this interval (Kremenetski et al., 1998). Larch could be found in this woodland up to $\sim 70^\circ\text{N}$, whereas spruce up to $\sim 68^\circ\text{N}$. Fragments of

larch macrofossils were found along with birch in the Seyakha river valley, and fragments of spruce (*Picea obovata*) along with it in the Yuribey river deposits. The total content of coniferous pollen in the Seyakha river deposits constitutes less than 5% (Lapteva et al., 2024), whereas *Picea* pollen concentration in the Yuribey river valley exceeds 10%. Displacement of the tree birch range to the south of $\sim 70^\circ\text{N}$ is recorded at the end of the Greenlandian stage around 8.7–8.5 cal ka BP. This is indicated by disappearance of macrofossils and a decrease in *Betula* sect. *Betula* pollen up to 10% (Lapteva et al., 2024). Forest vegetation gradually degraded there, and subarctic tundra spread. Open forests or even closed taiga-type forests of tree birch, larch, and spruce existed in the valleys of the Yuribey ($\sim 68.5^\circ\text{N}$) and Khadytayakha ($\sim 67.5^\circ\text{N}$) rivers during the Northgrippian stage (8.2–4.2 cal ka BP), which is evidenced by the abundance of pollen and macrofossil finds of these arboreal species and boreal herbaceous plants (Panova et al., 2010). In addition, dendrochronological studies confirm that the northern forest boundaries gradually shifted southward of $\sim 68^\circ\text{N}$ during the Holocene period (Hantemirov et al., 2021). Pollen abundance decreased and macrofossils of spruce and tree birch disappeared from the Yuribey river deposits between 4.9 and 4.4 cal ka BP. This confirms the disappearance of arboreal vegetation in the Yuribey river valley and the formation of open tundra landscapes at the end of the Northgrippian stage. The tree-ring analysis (Hantemirov et al., 2021) of the youngest subfossil wood find discovered northward of 68°N indicates that the tree died in 2419 BC (4370 cal BP), and the number of trees diminished between 2550 and 2250 BC (4.5–4.2 cal ka BP). Palaeobotanical data (Panova et al., 2010) and subfossil wood finds (Hantemirov et al., 2021) show that arboreal vegetation also existed further south, in the Khadytayakha river valley, during the Meghalayan stage (~ 4.2 –0 cal ka BP). Today, birch (*Betula pubescens* subsp. *tortuosa*), larch (*Larix sibirica*), and spruce (*Picea obovata*) grow in the Khadytayakha river valley and form the northern forest boundary and extrazonal forest communities in Yamal (Rebristaya, 2013).

5. Conclusions

A comprehensive palaeobotanical study and radiocarbon dating of peat bog deposits of the Seyakha, Yuribey and Khadytayakha rivers enabled us to reconstruct the history of the Yamal vegetation changes along the North-South transect in the Late Glacial and Holocene.

Acknowledgements

The research was supported by the state assignments of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. 122021000095-0) and Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. FWZG-2023-0010).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Faegri K., Iversen J. 1975. Textbook of pollen analysis, 3rd edn. Blackwell, Oxford
- Hantemirov R.M., Shiyatov S.G., Gorlanova L.A. et al. 2021. An 8768-year Yamal tree-ring chronology as a tool for paleoecological reconstructions. *Russian Journal of Ecology* 52: 419–427. DOI: [10.1134/S1067413621050088](https://doi.org/10.1134/S1067413621050088)
- Korona O.M., Trofimova S.S., Lapteva E.G. 2014. The First Reconstruction of the Late Glacial Plant Communities on the Yamal Peninsula Based on Plant Macrofossils. *Doklady Biological Sciences* 455: 83–86. DOI: [10.1134/S0012496614020021](https://doi.org/10.1134/S0012496614020021)
- Kremenetski C.V., Sulerzhitsky L.D., Hantemirov R. 1998. Holocene history of the northern range limits of some trees and shrubs in Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 30: 317–333. DOI: [10.2307/1552004](https://doi.org/10.2307/1552004)
- Lapteva E.G., Korona O.M., Kosintsev P.A. 2024. Dynamics of the vegetation of Central Yamal in the Holocene. *Russian Journal of Ecology* 55: 1–11. DOI: [10.1134/S1067413624010053](https://doi.org/10.1134/S1067413624010053)
- Nikitin V.P. 1969. *Paleokarpologicheskii metod (Paleocarpological Method)*. Tomsk. Gos. Univ., Tomsk. (in Russian)
- Panova N.K., Trofimova S.S., Antipina T.G. et al. 2010. Holocene dynamics of vegetation and ecological conditions in the Southern Yamal Peninsula according to the results of comprehensive analysis of relict peat bog deposits. *Russian Journal of Ecology* 41: 20–27. DOI: [10.1134/S1067413610010042](https://doi.org/10.1134/S1067413610010042)
- Rebristaya O.V. 2013. *Flora poluostrova Yamal. Sovremennoe sostoyanie i istoriya formirovaniya (Flora of the Yamal Peninsula. Modern State and History of the Formation)*. LETI, St. Petersburg. (in Russian)

Динамика растительности Ямала в голоцене на основе палеоботанических данных из отложений реликтовых торфяников

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYКорона О.М.¹, Трофимова С.С.¹, Жилич С.В.², Лаптева Е.Г.^{1*}¹Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, 202, Екатеринбург, 620144, Россия²Институт археологии и этнографии СО РАН, проспект Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведено комплексное палеоэкологическое изучение озерно-болотных отложений из шести местонахождений рек Сеяхи (~70⁰ с.ш.), Юрибей (~68.5⁰ с.ш.) и Хадытаяхи в зоне субарктических тундр на полуострове Ямал. На основе результатов палинологического и карпологического методов и данных радиоуглеродного датирования прослежены хронологические изменения растительных сообществ полуострова по трансекте с севера на юг в позднеледниковый и послеледниковый периоды. Установлено, в бёллинг-аллерёдском потеплении (14.7–12.7 тыс. кал. л.н.) существовали редколесья из березы древовидной и ели в долине р. Юрибей. В позднем дриасе около 12.6–11.7 тыс. кал. л.н. на данной территории в климатических условиях близких к современным были распространены кустарниковые тундры с *Betula nana*. Около 10.2–9.7 тыс. кал. л.н. в связи с улучшением климатических условий началось распространение древесных пород (*Betula sect. Betula*, *Picea obovata*, *Larix sibirica*) и сопутствующих им бореальных травянистых растений. Наиболее благоприятные условия для произрастания березы древовидной формы и лиственницы в долине р. Сеяхи были в интервале 10.2–8.7 тыс. кал. л.н., этих же пород совместно с елью в долине р. Юрибей в интервале 10.2–4.4 тыс. кал. л.н. Были распространены редколесья или даже сомкнутые леса, климат был значительно теплее современного. После деградации лесной растительности в долинах рек Сеяхи после 8.7–8.5 тыс. кал. л.н. и Юрибей после 4.7–4.3 тыс. кал. л.н. распространились открытые ландшафты с тундровыми сообществами. Климатические условия стали близки к современным. В долине р. Хадытаяха древесные породы произрастают в настоящее время, формируя экстразональные лесные сообщества среди зональных субарктических тундр.

Ключевые слова: палеоэкология, пыльца, макроостатки растений, север Западной Сибири, интерстадиал бёллинг-аллерёд, поздний дриас, голоцен

Для цитирования: Корона О.М., Трофимова С.С., Жилич С.В., Лаптева Е.Г. Динамика растительности Ямала в голоцене на основе палеоботанических данных из отложений реликтовых торфяников // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 446–451. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-446

1. Введение

Полуостров Ямал – регион Арктики, активно изучаемый в палеоэкологическом плане на протяжении многих десятилетий. К настоящему времени накоплен довольно обширный материал по динамике растительности полуострова Ямал в голоцене на основе результатов палинологического изучения, анализа растительных макроостатков и сборов субфоссильной древесины, но не все материалы пригодны палеоэкологических реконструкций. Информация о растительных сообществах и их динамике в конце позднего плейстоцена еди-

на. Цель настоящей работы – проследить динамику растительных сообществ Ямала по трансекте с севера на юг в течение позднеледниковья и голоцена на основе данных палинологического и палеокарпологического анализов отложений реликтовых торфяников.

2. Материалы и методы

Основой для палеоэкологических реконструкций послужили пыльца, макроостатки растений и радиоуглеродные даты, полученные из

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lapteva@ipae.uran.ru (Е.Г. Лаптева)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



изученных нами шести разрезов озерно-болотных отложений в бассейнах рек Сеяха (~70⁰ с.ш.; Lapteva et al., 2024), Юрибей (~68.5⁰ с.ш.; Корона и др., 2014) и Хадытаяха (~67.5⁰ с.ш.; Панова и др., 2010). Палинологический и палеокарпологический анализы выполнены по стандартным методикам (Никитин, 1969; Faegri and Iversen, 1975). В данной работе используется калиброванный возраст (2σ) радиоуглеродных дат, первичная информация содержится в указанных публикациях.

3. Результаты

Анализ палеоботанических данных показал, что полученные разновозрастные пыльцевые спектры и комплексы макроостатков растений, характеризующие интервал от 14.7 до 4.2 кал. л.н., можно разделить на две группы. В палеофлорах первой группы преобладает пыльца и макроостатки карликовой березки (*Betula nana* L.) и ивы (*Salix* sp.) при участии гипоарктических кустарничков (Ericales), полыни (*Artemisia*), видов осок (Cyperaceae), дикорастущих злаков (Poaceae), тундрового разнотравья. Во вторую группу объединены палеофлоры с высоким содержанием пыльцы, обилием или единичным присутствием вегетативных частей, плодов и семян древесных растений (*Betula* sect. *Betula*, *Larix*, *Picea obovata*).

4. Обсуждение

Наиболее древние комплексы макроостатков растений содержащие семена березы древовидной (*Betula* sect. *Betula*) и фрагменты хвоинок ели (*Picea* sp.) получены из отложений в долине р. Юрибей. Возраст комплексов установлен по двум AMS ¹⁴C датам 14810-14150 и 13070-12720 кал. л.н., которые соответствуют интерстадиалу бёллинг-аллерёд (14.7–12,7 тыс. кал. л.н.) (Корона и др., 2014). Пыльцевые данные отсутствуют. В это время были распространены березовые и березово-еловые редколесья лесотундрового типа с ерником и болотно-луговой растительностью.

Пыльцевые спектры и комплекс макроостатков с доминированием карликовой березки, ивы, осок, в том числе *Carex* spp. и *Eriophorum* sp., злаков, Rosaceae, в том числе *Potentilla* sp. и *Rubus chamaemorus*, *Artemisia*, Polygonaceae, Ranunculaceae получены из отложений первой террасы р. Юрибей, возраст которых подтверждён ¹⁴C датой 12.6–11.9 тыс. кал. л.н., что соотносится с поздним дриасом (12.7–11.7 тыс. кал. л.н.). Суммарное содержание пыльцы деревьев в пыльцевых спектрах менее 15%, макроостатки деревьев отсутствуют. В это время кустарниковые тундры из карликовой березки при участии ивы и видов осоковых, злаковых и тундрового разнотравья доминировали. В местообитаниях с несформированным дерновым покровом произрастала полынь. В настоящее время на аллювиальных склонах и участках с нарушенным почвенным покровом в долине р. Юрибей произрастает преи-

мущественно *Artemisia tilesii* (Ребристая, 2013).

Широкое распространение березовых редколесий при участии лиственницы вплоть до ~70⁰ с.ш. и ели до ~68.5⁰ с.ш. выявлено в интервале 10.2-8.7 кал. л.н., который соответствует гренландской стадии (11,7-8,2 тыс. кал. л.н.) голоцена. Об этом свидетельствуют увеличение обилия пыльцы (20-30%) и массовые находки макроостатков *Betula* sect. *Betula* в отложениях в районе рек Сеяха и Юрибей. Также датированные находки полуископаемой древесины березы из разных точек Ямала соответствуют этому возрастному интервалу (Kremenetski et al., 1998). Вместе с березой обнаружены фрагменты макроостатков лиственницы в долине р. Сеяхи, а вместе с ней ели (*Picea obovata*) в отложениях р. Юрибей. Суммарное содержание пыльцы хвойных пород в отложениях р. Сеяхи составляет менее 5% (Lapteva et al., 2024), а в долине р. Юрибей содержание *Picea* превышает 10%. Смещение ареала березы древовидной к югу от ~70⁰ с.ш. фиксируется около 8.7-8.5 кал. л.н. в конце гренландской стадии по исчезновению макроостатков и уменьшению пыльцы *Betula* sect. *Betula* до 10% (Lapteva et al., 2024). Постепенно лесная растительность здесь деградировала и распространились субарктические тундры. В долинах рек Юрибей (~68.5⁰ с.ш.) и Хадытаяха (~67.5⁰ с.ш.) редколесья или даже сомкнутые леса таежного типа из березы древовидной, лиственницы и ели существовали в течение северогриппианской стадии (8,2-4,2 тыс. кал. л.н.), что подтверждается обилием пыльцы и находками макроостатков этих древесных пород и бореальных травянистых растений (Панова и др., 2010). В то же время в течении этого интервала голоцена происходило постепенное смещение к югу от ~68⁰ с.ш. северной границы леса, что подтверждается дендрохронологическими исследованиями (Хантемиров и др., 2021). Сокращение обилия пыльцы и исчезновение макроостатков ели и березы древовидной в отложениях р. Юрибей наблюдается в интервале 4.9–4.4 тыс. кал. л.н. подтверждает исчезновение древесной растительности в долине р. Юрибей и формирование открытых тундровых ландшафтов в конце северогриппианской стадии. Согласно результатам древесно-кольцевого анализа полуископаемой древесины (Хантемиров и др., 2021), последнее из найденных к настоящему времени деревьев севернее 68⁰ с.ш. погибло в 2419 г. до н.э. (4370 кал. л.н.), а сокращение численности деревьев происходило в интервале 2550–2250 гг. до н.э. (4.5–4.2 тыс. кал. л.н.). Южнее, в долине р. Хадытаяха древесная растительность существовала также в течение мегхалайской стадии (~4,2–0 тыс. кал. л.н.), о чем свидетельствуют палеоботанические данные (Панова и др., 2010) и находки полуископаемой древесины (Хантемиров и др., 2021). В настоящее время береза древовидной группы (*Betula pubescens* subsp. *tortuosa*), лиственница (*Larix sibirica* L.) и ель (*Picea obovata*) произрастают в долине р. Хадытаяха, формируют северную границу леса и экстразональные лесные сообщества на Ямале (Ребристая, 2013).

5. Заключение

Результаты комплексного палеоботанического изучения и радиоуглеродного датирования озерно-болотных отложений рек Сеяха, Юрибей и Хадытаяха позволили восстановить историю изменений растительности Ямала по трансекте с севера на юг в течение позднеледниковья и голоцена.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках ГЗ Института экологии растений и животных УрО РАН (тема № 122021000095-0) и Института археологии и этнографии СО РАН (тема № FWZG-2023-0010).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Корона О.М., Трофимова С.С., Лаптева Е.Г. 2014. Первые реконструкции позднеледниковых растительных сообществ полуострова Ямал на основе растительных макроостатков. Доклады Академии наук 455 (1): 110–113. DOI: [10.7868/S0869565214070275](https://doi.org/10.7868/S0869565214070275)

Никитин В.П. 1969. Палеокарпологический метод. Томск: Томский гос. ун-т.

Панова Н.К., Трофимова С.С., Антипина Т.Г. и др. 2010. Динамика растительности и экологических условий в голоцене на Южном Ямале (по данным комплексного анализа отложений реликтового торфяника). Экология 1: 22–30.

Ребристая О.В. 2013. Флора полуострова Ямал. Современное состояние и история формирования. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Хантемиров Р.М., Шиятов С.Г., Горланова Л.А. и др. 2021. 8768-летняя Ямальская древесно-кольцевая хронология как инструмент для палеоэкологических реконструкций. Экология. № 5: 388-397. DOI: [10.31857/S0367059721050085](https://doi.org/10.31857/S0367059721050085)

Fægri K., Iversen J. 1975. Textbook of pollen analysis, 3rd edn. Blackwell, Oxford

Kremenetski C.V., Sulerzhitsky L.D., Hantemirov R. 1998. Holocene history of the northern range limits of some trees and shrubs in Russia. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 30: 317–333. DOI: [10.2307/1552004](https://doi.org/10.2307/1552004)

Lapteva E.G., Korona O.M., Kosintsev P.A. 2024. Dynamics of the vegetation of Central Yamal in the Holocene. Russian Journal of Ecology 55: 1–11. DOI: [10.1134/S1067413624010053](https://doi.org/10.1134/S1067413624010053)

Peat deposits for studying the Holocene fire regime in the example of Kansk forest-steppe mires



Mikhailova A.B.*, Grenaderova A.V., Chentaeva Z.V., Skrebatun A.A.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Siberian Federal University», Svobodny str, 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

ABSTRACT. The results of Holocene fires history reconstruction in the Kansk forest-steppe Krasnoyarsk Territory are presented using the example the Kuskun mire (Esaulovka river basin) and Rybnoye mire (Rybnaya river basin). The complex of paleoecological methods (analysis of macrofossils in peat and charcoal analysis) are using. The stages of increased fire activity were established at 4000-3000 and 1500-500 cal yr BP. These time intervals coincide with a decrease in moisture during the subboreal xerothermic maximum and a short dry period 1400-1300 cal. yr BP subsequently replaced by the Medieval Warm Period. When comparing the results obtained, a coincidence of long fire episodes with a change in local vegetation was revealed.

Keywords: Holocene, paleoecological reconstructions, peat deposits, charcoal analysis, Kansk forest-steppe

For citation: Mikhailova A.B., Grenaderova A.V., Chentaeva Z.V., Skrebatun A.A. Peat deposits for studying the Holocene fire regime in the example of Kansk forest-steppe mires // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 452-457. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-452

1. Introduction

Mire deposits are informative paleoarchives. A comprehensive study of mires using paleoecological methods it becomes possible to identify the response of plant communities to the total impact of climatic and pyrogenic factors, which is currently extremely important due to global climate change and the increased number of fires (Climate report..., 2023).

Throughout the Holocene, the number of fires increased during periods marked by rising temperatures and dry climate conditions and decreased during cold and humid periods, which in turn accumulated large amounts of flammable materials (Whitlock et al., 2010).

2. Materials and methods

The paleoecology mire study has been carried out since 2010 on the territory of the Kansk forest-steppe (Krasnoyarsk Territory) (Rodionova and Grenaderova, 2016; Mikhailova et al., 2021). The features of the local and regional vegetation development, moisture conditions are being studied and the fire regime is being reconstructed, which together makes it possible to reconstruct the dynamics of land-

scapes throughout the Holocene. This study presents the results of two lowland mire study: the Kuskun mire of the first above-floodplain terrace of the Esaulovka River (the 1st order right tributary of the Yenisei River) and the Rybnoe mire, located in the floodplain of the Rybnaya River (the 1st order right tributary of the Kan River, the source is located in the Koisky Belogorye, Eastern Sayan). The main research methods were the macrofossils analysis of peat, performed according to standard methods (Tyuremnov, 1976) and charcoal analysis, which consists of identifying and counting macro charcoal particles larger than 100 microns in size (Clark, 1988) and further processing in the program CharAnalysis (Higuera, 2009).

3. Results

According to the study of the Kuskun mire sediments covering a time period of 5700 calendar years BP (cal yr BP), the presence of fire events was established: 5700, 5300, 4400, 4100, 3700, 3100, 2900, 2000, 1700, 1400 and 600 cal yr BP (Fig. 1). The dates of fire episodes for which the rate of accumulation of charcoal particles per cm² per year did not reach the threshold value are also noted: 3500, 3300, 1000, 900 and 300 cal yr BP (points on the graph).

*Corresponding author.

E-mail address: arodionova@sfu-kras.ru (A.B. Mikhailova)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



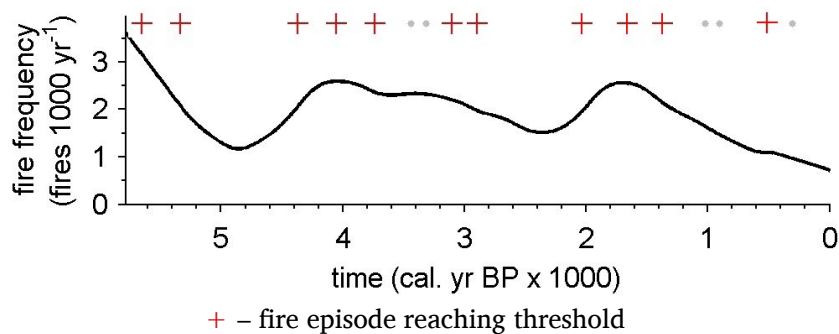


Fig.1. Frequency of fires according to the study of the Kuskun mire.

For the Rybnoe mire which located in 50 km east of the Kuskun mire over a period of 5400 cal yr BP the following fire events were noted: 4700, 3950, 3350, 3200, 2550, 800 cal yr BP (Fig. 2).

According to comparing the results, the following intervals of increased fire activity can be identified: 4000-3000 cal yr BP (2 fire events for the Kuskun and Rybnoe mire) 1000-500 cal yr BP (1 fire event for the Kuskun and Rybnoe mire and 2 fire events that did not reach the threshold value for these mire).

It has been established that in the range of 4000-3000 cal yr BP tree species took a significant part in the composition of local plant communities. For the Rybnoe mire the dominance of spruce (*Picea obovata* Ledeb) in the tree layer was observed and after 3000 cal yr BP an increase in birch (*Betula pubescence* L.) was noted, which may reflect a change in species due to pyrogenic succession. For the Kuskun mire in the indicated period 4000-3000 cal yr BP a stable presence of birch macroremains in the peat was recorded.

The next temporal stage of increased fire activity 1500-500 cal yr BP is also reflected in the composition of local vegetation. For the Kuskun and Rybnoe mires macroremains of birch were again recorded in significant quantities.

4. Discussion and conclusions

Based on this study it was established that increased fire activity and inter-fire intervals of 50-100 years are typical for periods of 4000-3000 as well as 1500-500 cal yr BP, which is consistent with a general decrease in moisture in the Krasnoyarsk Territory.

Koshkarov and Koshkarova (2003) for the Kas

River basin (northern part of the Krasnoyarsk Territory) produces 3800-3000 cal yr BP subboreal xerothermic maximum with rising temperatures and decreasing precipitation. According to the study of speleothems from the Torgashinskaya cave in the surroundings of Krasnoyarsk a decrease in the growth rate of stalagmite was recorded starting from 4.4 + 0.06/-0.09 thousand years ago and up to 3.8 thousand years ago, which indicates drier conditions (Columbu et al., 2023).

According to the study of the Pinchinskoye mire in the Esaulovka River basin (Mikhailova et al., 2021) recorded a short dry episode at 1400-1300 cal yr BP and Medieval Warm Period 1300-650 cal yr BP during which conditions could favor the occurrence of fires, but not as large as in the interval 4000-3000 cal yr BP. When comparing the results of charcoal analysis and macrofossils analysis a pattern of coincidence of fire events and an increased content of birch macroremains in the peat was established. Currently, for the burnt areas of hydromorphic dark coniferous forests of Eastern Siberia, the process of restoration by birch is very typical (Farber, 2012). According to the pollen analysis of Pinchinskoye and Bolshoye mire sediments in the Kansk forest-steppe during the indicated time intervals, birch was also present in the plant communities surrounding the mires, which in general may indicate a decrease in moisture (Mikhailova et al., 2021)

5. Acknowledgments

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

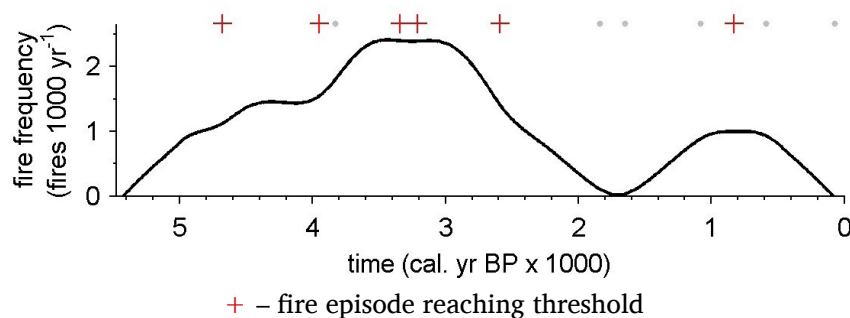


Fig.2. Frequency of fires according to the study of the Rybnoe mire

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Clark J. S. 1988. Particle motion and the theory of stratigraphic charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary research* 30: 67-80.
- Columbu A., Zhorniyak L.V., Zanchetta G.et.al. 2023. A mid-Holocene stalagmite multiproxy record from southern Siberia (Krasnoyarsk, Russia) linked to the Siberian High patterns. *Quaternary Science Reviews* 320: 108355. DOI: [10.1016/j.quascirev.2023.108355](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108355)
- Farber S.K. 2012. Impact of fires on forests in Eastern Siberia. *Forest taxation and forest management* 1 (47): 131-141 (in Russian)
- Higuera P.E.2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis : user's guide. Bozeman: Montana State University.
- Koshkarov A.D., Koshkarova V.L. 2003. Development of the natural environment of the river basin. Kas in the post-glacial period. *Paleogeography of Central Siberia* 3. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State University. 38-43. (in Russian)
- Mikhailova A.B., Grenaderova A.V., Kurina I.V. et.al. 2021. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia. *Boreas* 50(4):948-966. DOI: [10.1111/bor.12542](https://doi.org/10.1111/bor.12542)
- Report on climate features on the territory of the Russian Federation for 2023. 2024. Moscow. (in Russian)
- Rodionova A.B., Grenaderova A.V. 2016. Study of macrofossils in peat for the purpose of reconstructing the paleoecological conditions of the Kansk forest-steppe (Yenisei Siberia). *Environmental Dynamics and Global Climate Change* 7. No. 1 (13): 108-115. (in Russian)
- Tyuremnov S.N. 1976. Peat deposits. Ed. 3rd. Moscow: Nedra. (in Russian)
- Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B. et al. 2010. Paleoecological Perspectives on Fire Ecology: Revisiting the Fire-Regime Concept. *The Open Ecology Journal* 3: 6-23. DOI: [10.2174/1874213001003020006](https://doi.org/10.2174/1874213001003020006)

Торфяные отложения как основа для изучения пожарного режима голоцена на примере болот Канской лесостепи



Михайлова А.Б.*, Гренадерова А.В., Чентаева З.В., Скребатун А.А.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты реконструкции истории пожаров в голоцене на территории Канской лесостепи Красноярского края на примере болота Кускун (бассейн р. Есауловка) и Рыбное (бассейн р. Рыбная) при помощи комплекса палеоэкологических методов (анализ макрофоссилий в торфе и палеоантракологический анализ). Установлены этапы усиления пожарной активности 4000-3000 и 1500-500 календарных лет назад. Данные временные интервалы совпадают с уменьшением увлажнения во время суббореального ксеротермического максимума и непродолжительного засушливого периода 1400-1300 кал.л.н. в последствии сменившимся Средневековым теплым периодом. При сравнении полученных результатов было выявлено совпадение продолжительных пожарных эпизодов со сменой локальной растительности.

Ключевые слова: голоцен, палеоэкологические реконструкции, торфяные отложения, палеоантракологический анализ, Канская лесостепь

Для цитирования: Михайлова А.Б., Гренадерова А.В., Чентаева З.В., Скребатун А.А. Торфяные отложения как основа для изучения пожарного режима голоцена на примере болот Канской лесостепи // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 452-457. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-452

1. Введение

Болотные отложения служат информативными палеоархивом, при комплексном изучении которых палеоэкологическими методами становится возможным выявить отклик растительных сообществ на суммарное воздействие климатического и пирогенного факторов, что в настоящее время крайне актуально в связи с глобальным изменением климата и возросшим количеством пожаров (Доклад об особенностях климата..., 2024).

На протяжении голоцена число пожаров увеличивалось в периоды, отмечающиеся ростом температуры и сухости климата, и уменьшалось в холодные и влажные периоды, в которые в свою очередь накапливается большое количество легкогорючих материалов (Whitlock et al., 2010).

2. Материалы и методы

На территории Канской лесостепи Красноярского края изучение палеоэкологии болот проводится с 2010 года (Родионова и Гренадерова, 2016; Mikhailova et al., 2021). Изучаются не только особенности развития локальной и региональной

растительности, условия увлажнения, но так же проводится реконструкция пожарного режима, что в комплексе делает возможным реконструкцию динамики ландшафтов на протяжении голоцена.

В данной работе представлены результаты изучения двух низинных болот: болото Кускун первой надпойменной террасы р. Есауловка (правый приток р. Енисей 1-го порядка) и болото Рыбное, расположенного в пойме р. Рыбная (правый приток р. Кан 1-го порядка, берущий начало в отрогах Койского Белогорья в Восточном Саяне).

Основными методами исследования стали анализ макрофоссилий в торфе, выполненный по стандартной методике (Тюремнов, 1976) и палеоантракологический анализ, заключающийся в идентификации и подсчете частиц макроугля размером более 100 мкм (Clark, 1988) и дальнейшей обработке в программе CharAnalysis (Higuera, 2009).

3. Результаты

По данным изучения отложений болота Кускун, охватывающих временной период 5700 календарных лет (далее – кал.л.н.), установлено наличие пожарных событий: 5700, 5300, 4400, 4100,

*Автор для переписки.

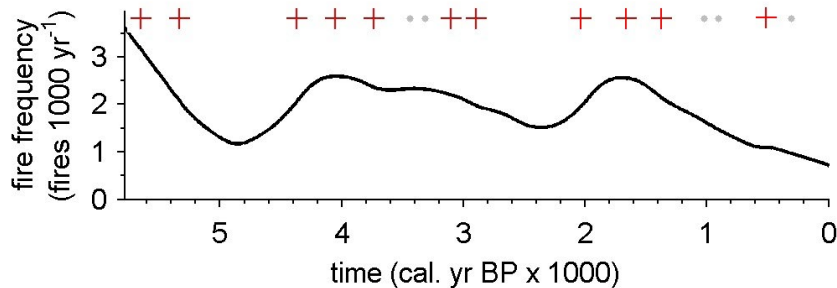
Адрес e-mail: arodionova@sfu-kras.ru (А.Б. Михайлова)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.





+ – пожарный эпизод, достигший порогового значения

Рис.1. Частота возгораний по данным изучения болота Кускун

3700, 3100, 2900, 2000, 1700, 1400 и 600 кал.л.н. (рис. 1) Также отмечаются даты возникновения пожарных эпизодов, для которых скорость аккумуляции частиц угля на см² в год не достигла порогового значения: 3500, 3300, 1000, 900 и 300 кал.л.н. (точки на графике).

Для болота Рыбное, расположенного в 50-ти км восточнее болота Кускун, за период 5400 кал. л.н. отмечаются следующие пожарные события: 4700, 3950, 3350, 3200, 2550, 800 кал.л.н (рис.2).

При сравнении полученных результатов можно выделить следующие интервалы усиления пожарной активности: 4000-3000 кал.л.н. (2 пожарных события для болота Кускун и Рыбное) 1000-500 кал. л. н. (1 пожарное событие для болота Кускун и Рыбное и 2 пожарных события, не достигших порогового значения для данных болот).

Установлено, что в интервале 4000-3000 кал. л. н. в составе локальных растительных сообществ значительное участие принимали древесные породы. Так, для болота Рыбное наблюдается доминирование в древесном ярусе ели (*Picea obovata* Ledeb), а после 3000 кал.л.н. отмечено увеличение березы (*Betula pubescence* L.), что может отражать смену пород вследствие пирогенной сукцессии. Для болота Кускун в указанный период 4000-3000 кал.л.н. фиксируется стабильное присутствие в торфе макроостатков березы.

Следующий временной этап усиления пожарной активности 1500-500 кал.л.н также находит отражение в составе локальной растительности. Так для болот Кускун и Рыбное вновь в значительном количестве фиксируются макроостатки березы.

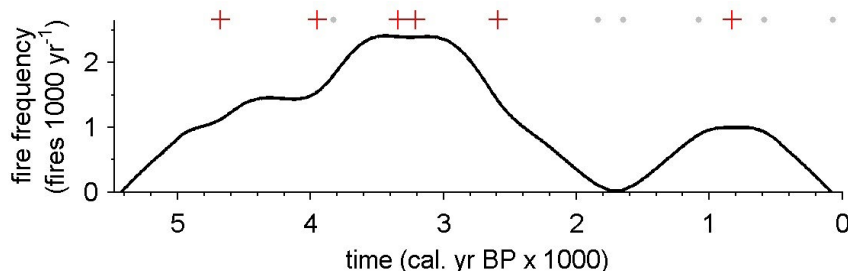
4. Обсуждение и выводы

На основании проведенного исследования установлено, что усиление пожарной активности и межпожарные интервалы в 50-100 лет характерны для периодов 4000-3000, а также 1500-500 кал.л.н., что согласуется с общим уменьшением увлажнения территории Красноярского края.

Так, Кошкарров и Кошкаророва (2003) для бассейна р. Кас (северная часть Красноярского края) выделяют 3800-3000 кал. л. н. суббореальный ксеротермический максимум с ростом температуры и уменьшением количества осадков. По данным изучения спелеотем из пещеры Торгашинская в окрестностях г. Красноярск фиксируется уменьшение скорости нарастания сталагмита начиная с 4.4 + 0.06/-0.09 тыс. лет назад и вплоть до 3.8 тыс. лет назад, что указывает на более сухие условия (Columbu et al., 2023).

По данным изучения болота Пинчинское в бассейне р. Есауловка (Mikhailova et al., 2021) фиксируется непродолжительный засушливый эпизод 1400-1300 кал.л.н. и Средневековый теплый период 1300-650 кал. л. н., в течение которых условия могли способствовать возникновению пожаров, но не столь масштабных, как в интервал 4000-3000 кал. л. н.

При сравнении полученных результатов палеоантракологического анализа и анализа макрофоссилий установлена закономерность совпадения пожарных событий и повышенного содержания макроостатков березы в составе торфа. В настоящее время для гарей гидроморфных темнохвойных лесов Восточной Сибири весьма типичен процесс



+ – пожарный эпизод, достигший порогового значения

Рис.2. Частота возгораний по данным изучения болота Рыбное

восстановления березой (Фарбер, 2012). По данным спорово-пыльцевого анализа отложений болот Канской лесостепи Пинчинское и Большое в указанные временные интервалы береза присутствовала и в составе окружающих болота растительных сообществ, что в целом может свидетельствовать об уменьшении увлажнения (Mikhailova et al., 2021)

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00341, <https://rscf.ru/project/23-27-00341/>.

Список литературы

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. 2024. Москва.

Кошкарлов А.Д., Кошкарлова В.Л. 2003. Развитие природной среды бассейна р. Кас в послеледниковый период. Палеогеография Средней Сибири 3. Красноярск: Красноярский государственный университет. 38-43.

Родионова А.Б., Гренадерова А.В. 2016. Изучение макрофоссилий в торфе с целью реконструкции палеоэко-

логических условий Канской лесостепи (Приенисейская Сибирь). Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата 7. № 1 (13): 108-115.

Тюрменов С.Н. 1976. Торфяные месторождения. Изд. 3-е. Москва: Недра.

Фарбер С.К. 2012. Воздействие пожаров на леса Восточной Сибири. Лесная таксация и лесоустройство 1 (47):131-141. Clark J. S. 1988. Particle motion and the theory of stratigraphic charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. Quaternary research 30, 67-80.

Clark J. S. 1988. Particle motion and the theory of stratigraphic charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. Quaternary research 30: 67-80.

Columbu A., Zhornyak L.V., Zanchetta G. et.al. 2023. A mid-Holocene stalagmite multiproxy record from southern Siberia (Krasnoyarsk, Russia) linked to the Siberian High patterns. Quaternary Science Reviews 320: 108355. DOI: [10.1016/j.quascirev.2023.108355](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.108355)

Higuera P.E. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis: user's guide. Bozeman: Montana State University.

Mikhailova A.B., Grenaderova A.V., Kurina I.V. et.al. 2021. Holocene vegetation and hydroclimate changes in the Kansk forest steppe, Yenisei River Basin, East Siberia. Boreas 50(4):948-966. DOI: [10.1111/bor.12542](https://doi.org/10.1111/bor.12542)

Whitlock C., Higuera P.E., McWethy D.B. et al. 2010. Paleoeological Perspectives on Fire Ecology: Revisiting the Fire-Regime Concept. The Open Ecology Journal 3: 6-23. DOI: [10.2174/1874213001003020006](https://doi.org/10.2174/1874213001003020006)

Changes in the Baltic Sea levels during the Late Pleistocene the Late Pleistocene-Holocene transition



Kublitskiy Yu.A.*, Subetto D.A., Shatalova A.E., Demidionov M.Y.

Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Nab. Moyki, St. Petersburg, 191186, Russia

ABSTRACT. The article discusses the Pre-Baltic Sea history during the Late Pleistocene and Holocene periods. Despite a long history of research on this topic, there are still gaps in our knowledge that prevent us from creating an accurate and comprehensive paleo geographic reconstruction of the region during this time period. A table that provides information on the dates of bottom sediment samples from lakes, peat bogs, and archaeological sites that mark the earliest stages of Baltic Sea evolution, is included. The article identifies problems with the limited research on the Baltic Glacial Lake and Ioldium Sea sediments, as well as the maximum extent of the Ancylian transgression. A brief chronology of changes in water levels during the earliest stages of the Baltic is presented.

Keywords: Baltic Ice lake, Ioldium Sea, Ancylyus lake, isolation, transgression, regression, radiocarbon age

For citation: Kublitskiy Yu.A., Subetto D.A., Shatalova A.E., Demidionov M.Y. Changes in the Baltic Sea levels during the Late Pleistocene the Late Pleistocene-Holocene transition // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 458-462. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-458

1. Introduction

To assess the impact of global, regional, and local climatic factors on the lake sediments formation, it is essential to consider their position relative to the boundaries and depth of the reservoir where they are formed. For more than 200 years, changes in the Baltic Sea paleobasin level have been studied at the Late Pleistocene to the Holocene transition. However, a significant portion of these studies focused on the Littoral and Ladoga transgressions. Therefore, the collection and analysis of data on earlier stages of transgressive-regressive cycles of the Baltic Sea are of particular importance.

2. Materials and methods

Based on the analysis of available paleogeographic databases, such as «PALEOLADOGA» (Minina et al., 2018) and «PaleoBasin» (Kublitskiy et al., 2022), a table was compiled (Table.1). The table contains information on the results of studying bottom sediments in lakes, peatlands, and archaeological sites, which mark the most ancient stages in the Baltic Sea evolution. These stages include the Baltic Ice Lake (BIL), Ioldia Sea (IS), and Ancylyus Lake (AL).

3. Results and discussion

Thus, in the Gulf of Finland eastern part, Baltic Ice Lake deposits have been found at elevations up to 32.13 meters above sea level. The decrease in Baltic Ice Lake levels from this modern position occurred 11.2 ka cal BP years ago. Ioldium Sea deposits have been identified in the Nizhneosinovskiy Swamp and Lakhta Bay sedimentary layers. While there are no dating results for the Ioldium deposits within the Nizhneosinovskoye peat bog thickness, the estimated age is approximately 11,000 cal. years (Dolukhanov et al., 2007). In the Lakhta Bay, records indicate a separation from the Ioldium, but the obtained age (10.6 ka cal BP at -6.3 meters below sea level) is uncertain, as the Ancylyus transgression dates from the same period (Dolukhanov et al., 2007). The oldest evidence of the Ancylyus transgression onset has been identified in Nizhneosinovskiy peat bog sediment at an absolute elevation of 17,25 meters and has an age estimate of approximately 10.9 ka cal BP. Ancylyus regression occurred 9,7 ka cal BP from the level of 7 m above sea level.

4. Conclusions

Despite the long history of studying of the Pre-Baltic Sea level changes, there is very little reliable

*Corresponding author.

E-mail address: uriy_87@mail.ru (Yu.A. Kublitskiy)

Received: June 18, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Table 1. Dates marking the transgressive-regressive stages of the Pre-Baltic Sea at the turn of the Late Pleistocene and Holocene.

Object title	Reference	Age, ¹⁴ C BP	Age, cal BP (median)	Elevation (relative sea level)	Description of the event
Myantylampi Lake	Kuznetsov and Subetto, 2019	10790 ± 680	12600,00	14,00	BIL
Schukinskoye Lake	Kuznetsov and Subetto, 2019	9865 ± 60	11277,00	32,13	Isolation from BIL
Nizhneosinovskoe swamp	Dolukhanov et al., 2007	9580 ± 100	10925,00	17,25	Maximal level of AL
Babinskoye Lake	Sandgren et al., 2004	9565 ± 110	10910,00	7,08	AL
Lachtinsky bay	Morozov, 2014	9400 ± 200	10676,00	-6,30	Isolation from IS
Nizhneosinovskoe swamp	Dolukhanov et al., 2007	9330 ± 200	10580	20,50	Isolation from AL
Stand of Antrea Korpilakhti	Gerasimov and Subetto, 2009	9310 ± 140	10523,00	15,70	Maximal level of AL
Stand Borovskoe 1 (Antrea Suuri Kelpojarvi)	Gerasimov and Subetto, 2009	9275 ± 120	10466,00	29,50	Maximal level of AL
Lachtinsky bay	Morozov, 2014	9160 ± 150	10354,00	-2,74	Isolation from AL
Stavok Lake	Morozov, 2014	9050 ± 100	10210,00	22,00	Isolation from AL
Glukhoe Lake	Miettinen et al., 2007	9140 ± 180	10300	9	Isolation from AL
Nizhneosinovskoe swamp	Dolukhanov et al., 2007	8810 ± 120	9875,00	17,50	Isolation from AL
Protochnoye 1 (Kaukola Rupunkangas 1a)	Gerasimov and Subetto, 2009	8770 ± 85	9800,00	22,00	Isolation from AL
Protochnoye 5 (Kaukola Rupunkangas 3)	Gerasimov and Subetto, 2009	8740 ± 80	9748,00	21,50	Isolation from AL
Babinskoye Lake	Sandgren et al., 2004	8670 ± 50	9620,00	7,08	Isolation from AL
Lachtinsky bay	Morozov, 2014	8520 ± 100	9507,00	-6,01	Isolation from AL
Vysokinskoye Lake	Miettinen et al., 2007	8370 ± 150	9335,00	10,00	AL
Vysokinskoye Lake	Miettinen et al., 2007	8120 ± 130	9055,00	10,00	Isolation from AL

factual material about its most ancient stages. The revealed changes in the relative level of the Pre-Baltic Sea are generally correlated with other reconstructions (Bjork, 1995), however, new factual material is needed to quantify the intensity of its transgressive-regressive stages, their maximum levels, as well as to identify the role of regional factors in these changes.

5. Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 24-17-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

References

Björck S. 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 ka BP. *Quaternary International*. – Vol. 27. – 19-40.
Dolukhanov P.M., Shukurov A.M., Arslanov K.A. et al. 2007. Evolution of Waterways and Early Human Settlements in the Eastern Baltic Area: Radiocarbon-Based Chronology. *Radiocarbon* 49 (2):527-542. doi:[10.1017/S0033822200042442](https://doi.org/10.1017/S0033822200042442).

Gerasimov D.V., Subetto D.A. 2009. The history of Lake Ladoga in the light of archaeological data. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena [News of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen]* 106: 37-49. (in Russian)

Kublitskiy Yu.A., Shatalova A.E., Baranskaya A.V. et al. 2022. Changes in the levels of large water bodies of the periphery of the Fennoscandian shield in the Late Pleistocene and Holocene “Paleobasins”. Certificate of registration of the database RU 2022623647, 12/23/2022. Application No. 2022623627 dated 12.12.2022.

Kuznetsov D.D., Subetto D.A. 2019. Stratigraphy of bottom sediments of lakes of the Karelian Isthmus. Moscow: GEOS: 120.

Miettinen A., Savelieva L., Subetto D.A., et al. 2007. Palaeoenvironment of the Karelian Isthmus, the easternmost part of the Gulf of Finland, during the Littorina Sea stage of the Baltic Sea history. *Boreas* 36: 441-458.

Minina M.V., Subetto D.A., Kosheleva E.A., et al. 2018. Formation of the PALEOLADOGA database for paleolimnological research. *Geograficheskiy byulleten' [Geographical bulletin]* 2 (45): 18-27. doi:[10.17072/2079-7877-2018-2-18-27](https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-18-27)

Morozov D.A. 2014. Paleogeocological reconstructions of lake systems of the southern border of Fennoscandia. Cand. Sc. Dissertation, A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, St. Petersburg, Russia. (in Russian)

Sandgren P., Subetto D.A., Berglund B.E. et al. 2004. Mid-Holocene Littorina Sea transgressions based on stratigraphic studies in coastal lakes of NW Russia. *GFF* 126: 363-380.

Изменения уровней палеобассейна Балтийского моря на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Кублицкий Ю.А.*, Субетто Д.А., Шаталова А.Е., Демидионов М.Ю.

РГПУ им. А. И. Герцена, наб. реки Мойки, д. 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена истории развития стадий пра-Балтийского моря на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена. Показано, что несмотря на долгую историю изучения этого вопроса, до сих пор существуют белые пятна, препятствующие формированию точной и целостной палеогеографической реконструкции региона в указанный временной интервал. Приведена таблица, содержащая сведения о датировках донных отложений озер, торфяников и археологических памятников, маркирующих наиболее древние фазы эволюции Балтийского моря. Выявлены проблемы малой изученности как отложений Балтийского ледникового озера и Иольдиевого моря, так и максимального уровня анциловой трансгрессии Балтики. Представлена краткая хронология изменения уровней наиболее древних стадий Балтийского моря.

Ключевые слова: Балтийское ледниковое озеро, Иольдиевое море, Анциловое озеро, изоляция, трансгрессия, регрессия, радиоуглеродный возраст

Для цитирования: Кублицкий Ю.А., Субетто Д.А., Шаталова А.Е., Демидионов М.Ю. Изменения уровней палеобассейна Балтийского моря на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 458-462. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-458

1. Введение

Для оценки роли глобальных, региональных и локальных природно-климатических факторов в формировании озерных отложений необходимо учитывать их положение относительно границ и глубин водоема, в котором они формируются. Изменения уровней палеобассейна Балтийского моря на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена проводятся более 200 лет, однако значительная часть этих исследований была посвящена литориновой и ладожской трансгрессиям. В связи с этим, особый интерес представляет сбор и анализ данных о более ранних этапах трансгрессивно-регрессивных стадий Балтийского моря.

2. Материалы и методы

На основе изучения и дополнения имеющихся баз палеогеографических данных «PALEOLADOGA» (Минина и др., 2018) и «PaleoBasin» (Кублицкий и др., 2022), составлена таблица (табл. 1), содержащая сведения о результатах датирования донных отложений озер, торфяников и археологических

памятников, маркирующих наиболее древние этапы эволюции Балтийского моря (Балтийское ледниковое озеро (БЛО), Иольдиевое море (ИМ), Анциловое озеро (АО)).

3. Результаты и обсуждение

На территории восточной части Финского залива Балтийского моря отложения БЛО обнаружены на высотах до 32,13 м над у.м. Снижение уровня БЛО с этой современной отметки произошло 11,2 тыс. кал. л.н. Отложения Иольдиевого моря обнаружены в отложениях Нижнеосиновского болота и Лахтинского разлива. Результаты датирования отложений Иольдиевого моря в толще Нижнеосиновского болота отсутствуют, однако указывается возраст ~11,0 тыс. кал. л.н. (Dolukhanov et al., 2007). В Лахтинском разливе дата фиксирует изоляцию от Иольдиевого моря, но полученный возраст (10, 6 тыс. кал. л.н. на отметке -6,3 м от у.м.) вызывает сомнения, поскольку этим же временем датируется трансгрессия Анцилового озера (Dolukhanov et al., 2007). Наиболее древние сви-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: uriy_87@mail.ru (Ю.А. Кублицкий)

Поступила: 18 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Таблица 1. Датировки, маркирующие трансгрессивно-регрессивные стадии пра-Балтийского моря на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена.

Название объекта	Ссылка на источник	Возраст, ¹⁴ С, л.н.	Возраст, кал. л.н. (медиана)	Высота над у.м., м	Характеристика события
Оз.Мантюламп	Кузнецов и Субетто, 2019	10790 ± 680	12600	14,00	БЛО
Оз. Щукинское	Кузнецов и Субетто, 2019	9865 ± 60	11277	32,13	изоляция от БЛО
Нижнеосиновское болото	Dolukhanov et al., 2007	9580 ± 100	10925	17,25	максимальная стадия трансгрессии АО
Оз. Бабинское	Sandgren et al., 2004	9565 ± 110	10910	7,08	АО
Лахтинский разлив	Морозов, 2014	9400 ± 200	10676	-6,30	изоляция от ИМ
Нижнеосиновское болото	Dolukhanov et al., 2007	9330 ± 200	10580	20,50	изоляция от АО
Стоянка Антреа, Корпилахти	Герасимов и Субетто, 2009	9310 ± 140	10523	15,70	максимальная стадия трансгрессии АО
Стоянка Боровское 1	Герасимов и Субетто, 2009	9275 ± 120	10466	29,50	максимальная стадия трансгрессии АО
Лахтинский разлив	Морозов, 2014	9160 ± 150	10354	-2,74	изоляция от АО
Оз. Ставок	Морозов, 2014	9050 ± 100	10210	22	изоляция от АО
Оз. Глухое	Miettinen et al., 2007	9140 ± 180	10300	9	изоляция от АО
Нижнеосиновское болото	Dolukhanov et al., 2007	8810 ± 120	9875	17	изоляция от АО
Проточное 1 (Kaukola Rupunkangas 1a)	Герасимов и Субетто, 2009	8770 ± 85	9800	22	изоляция от АО
Стоянка Проточное 5 (Kaukola Rupunkangas 3)	Герасимов и Субетто, 2009	8740 ± 80	9748	21	изоляция от АО
Оз. Бабинское	Sandgren et al., 2004	8670 ± 50	9620	7,08	изоляция от АО
Лахтинский разлив	Морозов, 2014	8520 ± 100	9507	-6,01	изоляция от АО
Оз. Высокинское	Miettinen et al., 2007	8370 ± 150	9335	10	АО
Оз. Высокинское	Miettinen et al., 2007	8120 ± 130	9055	10	изоляция от АО

детельства начала Анциловой трансгрессии обнаружены в отложениях Нижнеосиновского болота на абсолютной высоте в 17,25 м и имеют возраст ~10,9 тыс. кал. л.н. Анциловая регрессия произошла 9,7 тыс. кал. л.н. от уровня 7 м абс.

4. Выводы

Несмотря на давнюю историю изучения изменения уровней пра-Балтийского моря, достоверного фактического материала о наиболее древних его стадиях крайне мало. Выявленные изменения относительного уровня пра-Балтийского моря в общих чертах соотносятся с другими реконструкциями (Bjork, 1995), однако для количественных оценок интенсивности его трансгрессивно-регрессивных стадий, их максимальных уровней, а также выявления роли региональных факторов на эти изменения, необходим новый фактический материал.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Список литературы

- Герасимов Д.В., Субетто Д.А. 2009. История Ладожского озера в свете археологических данных. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена 106: 37-49.
- Кублицкий Ю.А., Шаталова А.Е., Баранская А.В. и др. 2022. Изменения уровней крупных водных объектов периферии Фенноскандинавского щита в позднем плейстоцене и голоцене "Paleobasins". Свидетельство о регистрации базы данных RU 2022623647, 23.12.2022.
- Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. 2019. Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка. ГЕОС: 120.
- Минина М.В., Субетто Д.А., Кошелева Е.А., Кузнецов Д.Д. 2018. Формирование базы данных «PALEOLADOGA» для палеолимнологических исследований. Географический вестник 2 (45):18-27. doi [10.17072/2079-7877-2018-2-18-27](https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-2-18-27)
- Морозов Д.А. 2014. Палеогеоэкологические реконструкции озерных систем южного обрамления

Фенноскандии: дисс. ... канд. геогр. наук, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия.

Björck S. 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0–8.0 ka BP. *Quaternary International* 27: 19-40.

Dolukhanov P.M., Shukurov A.M., Arslanov K.A. et al. 2007. Evolution of Waterways and Early Human Settlements in the Eastern Baltic Area: Radiocarbon-Based Chronology. *Radiocarbon* 49 (2):527-542. doi:[10.1017/S0033822200042442](https://doi.org/10.1017/S0033822200042442).

Miettinen A., Savelieva L., Subetto D.A. et al. 2007. Palaeoenvironment of the Karelian Isthmus, the easternmost part of the Gulf of Finland, during the Litorina Sea stage of the Baltic Sea history. *Boreas* 36: 441-458.

Sandgren P., Subetto D.A., Berglund B.E., et al. 2004. Mid-Holocene Littorina Sea transgressions based on stratigraphic studies in coastal lakes of NW Russia. *GFF* 126: 363-380.

Environmental changes at the Pleistocene-Holocene boundary in glacial lakes of the North-East of Russia: results and prospects of multidisciplinary studies

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Minyuk P.S.*, Pozhidaeva D.K., Morozova M.A., Burnatny S.S.

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo FEB RAS, 16 Portovaya str., Magadan, Russia

ABSTRACT. Glacial lakes of the Magadan region - Grazevoe (61°08'21" N, 152°19'57" E), Tschuchye (61° 08.780' N, 152° 19.860' E), Nalimnoe (61°07'41" N, 152°20'8" E), Chernoe (61° 06.690' N., 152° 15.570' E), Sosednee (62°03'29" N, 149°31'22" E), Sapog (63°29'9" N, 147°50'41" E), Vodorazdel'noe (63°44'8" N, 148°13'4" E), Ui (63°49'31" N, 147°53'21" E), Forel (63°50'01.61" N, 147°51'03.75" E) have been studied. Most lakes were formed at the end of the Late Pleistocene or at the beginning of the Early Holocene. The sedimentation features of the Late Pleistocene and Holocene differed significantly. The Late Pleistocene stage is characterized by the dominance of terrigenous sediment, while the Holocene is dominated by biogenic sedimentation. The key biotic and abiotic paleoenvironmental proxies from glacier records are shown.

Keywords: lake sediments, Holocene, Pleistocene, natural environment

For citation: Minyuk P.S., Pozhidaeva D.K., Morozova M.A., Burnatny S.S. Environmental changes at the Pleistocene-Holocene boundary in glacial lakes of the North-East of Russia: results and prospects of multidisciplinary studies // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 463-468. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-463

1. Introduction

The lakes are numerous in the Magadan region (Izmaylova, 2018). Depending on their origin, they are divided into floodplain-valley, coastal-lagoon, glacial, glacial-tectonic, thermokarst (Electronic reference book "Lakes of Russia", <http://wp.limno.org.ru/win/ruslake.htm>). Glacial lakes are common in mountainous areas and most of them formed at the end of the Late Pleistocene-Early Holocene. In this regard, their sediments provide information about the peculiarity of climatic changes during the last glacial-interglacial cycle, including the global environmental changes at the border of the Pleistocene and Holocene. The intensive start of the study of lake sediments in the region began in the 90s of the last century. The obtained data on the age of sediments, accumulation conditions, palynology, paleogeographic reconstructions are presented in numerous papers by A.V. Lozhkin, P.M. Anderson and co-authors (Lozhkin et al., 2016; 2024 and references herein). Lakes Elikchan-1,4, Alut, Elgennya, Jack London, Sosednee, Goluboe, Tschuchye, Priyatnoe, Julietta, Smorodinovoe, Podkova, Lesnoe, Chernoe, Glukhoe, etc. were studied. Since the 2000s lake sediments have been studied using rock magnetic, geochemical, mineralogical, and lithological methods (Minyuk

and Pozhidaeva, 2023). This approach allows us to determine the environmental response, including biotic and abiotic components, to climatic changes in the past. The study of the catchment deposits, the comparison of the results with data on lake sediments promote to the correct interpretation of lake sedimentation.

2. Objects and methods of research

Sediments of lakes of the Talaya group including Gryazevoe (61°08'21" N, 152°19'57" E), Tschuchye (61° 08.780' N, 152° 19.860' E), Nalimnoe (61°07'41" N, 152°20'8" E) and Goluboe (61° 06.690' N., 152° 15.570' E), as well as lakes Sosednee (62°03'29" N, 149°31'22" E), Sapog (63°29'9" N, 147°50'41" E), Vodorazdel'noe (63°44'8" N, 148°13'4" E), Ui (63°49'31" N, 147°53'21" E), Forel (63°50'01.61" N, 147°51'03.75" E) were studied. These lakes are of glacial origin, they are located among moraine deposits. Most of them were formed at the end of the Late Pleistocene or at the beginning of the Early Holocene. The lake water is ultra-fresh, bicarbonate with low dissolved solids (< 50 mg/l). The lakes are shallow, the maximum depths are in the lakes Nalimnoe (16 m), Sapog (14 m), Sosednee (13 m). Several cores have been taken in each lake to determine

*Corresponding author.

E-mail address: minyuk@neisri.ru (P.S. Minyuk)

Received: May 19, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the features of the filling of lake basins with sediments. Lake sediments are mainly composed of silt.

Organic massif silt dominates in the upper part of the sections, thin-layered, varve silt, sand and gravel deposits are in the lower part (Fig). The tephra of the Kuril Lake caldera with an age of 7,600 years was found in the sediments of all lakes. The thickness of the studied cores is 780 cm (Gryazevoe), 235 cm (Nalimnoe), 164 cm (Goluboe), 424 cm (Sosednee), 100 cm (Sapog), 196 cm (Vodorazdel'noe), 199 cm (Ui-3), 227 cm (Forel).

The sediments were studied by petrophysical, geochemical, palynological, diatom (Lake Gryazevoe), optical, mineralogical, thermomagnetic methods.

3. Results and discussion

The sedimentation features of the Late Pleistocene and Holocene differed significantly. The Late Pleistocene stage is characterized by the dominance of terrigenous sediment. The geochemical and rock magnetic parameters of lake sediments are similar to those from deposits of catchment. As a rule, they are characterized by increased values of magnetic susceptibility (MS), saturation remanence (Jrs), saturation magnetization (Js), low proportion of paramagnetic component (Jp), low organic matter content (LOI). Among the geochemical data, detritus components predominate – Al_2O_3 , TiO_2 , MgO. Grassy vegetation dominated in the vicinity of the lakes, and the bio-productivity of the water basins was low. The maximum thickness of Pleistocene sediments is in the Gryazevoe and Sosednee lakes, which, according to radiocarbon dating, formed about 22-26 thousand cal. years ago.

The climatic changes at the end of the Pleistocene affected all biotic and abiotic parameters of the sediment. Palynological data indicate a directional warming of the climate. In the spore-pollen spectra, tree and

shrub taxa *Betula*, *Alnus*, *Pinus* subgenus *Haploxyylon* are replace of herbaceous plants. The accumulation of organic carbon (= LOI) began to gradually increase in lakes, leading to a decrease in the scalar magnetic parameters (MS, Js, Jrs) of sediment. The growth of diatoms caused the accumulation of biogenic silica, which also reduced the magnitudes of the magnetic parameters. To assess the relative content of biogenic silica, the SiO_2 contents and SiO_2/TiO_2 values of lake sediments and deposit of catchment was compared. In the Early Holocene, a chemogenic accumulation of highly coercive iron-containing minerals, presumably iron hydroxides, was occur. At the stage of diagenesis, the formation of authigenic iron sulfides – pyrite, greigite, pyrrhotite, which often have a framboidal structure, occurred in lake sediments.

Lakes of coastal depressions differ from glacial lakes in many ways. Lakes located in the Lankovaya (Lake Chistoe, Lb-1, Lb-2, Korchan) and Kava-Tau (Lake Chukcha, Bezymyanka) Cenozoic depressions are studied (Ignatova, 2007). These lakes are of Holocene age. The sediments thickness in the Chukcha and Chistoe lakes is about 10 m.

The strong magnetization of sediments, a single-component magnetization, a small content of organic matter is a good promise for studying secular variations of the geomagnetic field and the cyclicity of sedimentation.

4. Conclusions

Sediments of glacial lakes in the North-East of Russia is a favorable object for studying the environment changes at the boundary of the Late Pleistocene and Holocene. Evidence of environmental changes is manifested in changes in both terrestrial and aquatic ecosystems.

Acknowledgements

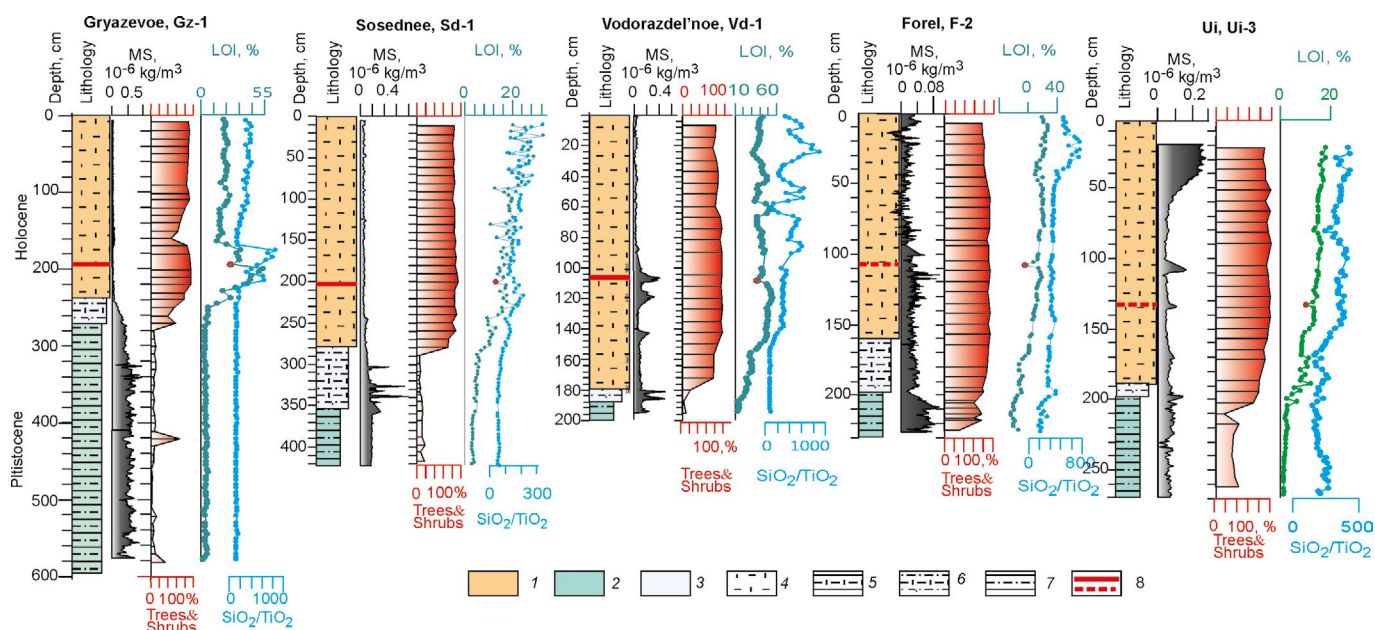


Fig. Lithology, depth variations of MS, trees and shrubs percentage content, LOI, SiO_2/TiO_2 from lacustrine sediments of selected glacier lakes: 1 – Holocene sediments; 2 – Late Pleistocene sediments; 3 – transitional layers; 4 – organic massive silt; 5 – organic layered silt; 6 – organic vaguely layered silt; 7 – layered silt; 8 – tephra.

The study was carried out within the State Task No. 121031700311-4.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

References

Ignatova V.A. 2007. Geological structure and oil and gas potential of Yama-Tauï prospective oil-and-gas-bearing basin (Magadan region). *Russian oil and gas geology* 4: 2–12 (in Russian)

Izmaylova A.V. 2018. Lake Water Resources in the Asian Part of the Russian Federation, *Water Resources* 45: 45–462(in Russian)

Lozhkin A.V., Brown T.A., Anderson P.M. et al. 2016. The Importance of Radiocarbon Dates and Tephra for Developing Chronologies of Holocene Environmental Changes from Lake Sediments, North Far East. *Russian Journal of Pacific Geology* 10: 249–262. DOI: 10.1134/S1819714016040047

Lozhkin A.V., Anderson P.M., Tsygankova V.I. 2024. Palynological records from glacial lakes, northern Priokhotye (western Beringia). *Quaternary International* 681: 1–10. DOI: 10.1016/j.quaint.2023.12.011

Minyuk P.S., Pozhidaeva D.K. 2023. Talaya group lakes (Magadan oblast): a promising object for paleoclimatic reconstructions of the Late Pleistocene and Holocene. *Bulletin of NESCFEB RAS* 3: 18–35 (in Russian)

Изменение природной среды на границе плейстоцена и голоцена в осадках ледниковых озер Северо-Востока России: результаты и перспективы исследований

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Минюк П.С.*, Пожидаева Д.К., Морозова М.А., Бурнатный С.С.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая 16, Магадан, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследованы ледниковые озера Магаданской области – Грязевое (61°08'21" с.ш., 152°19'57" в.д.), Щучье (61° 08.780' с.ш., 152° 19.860' в.д.), Налимное (61°07'41" с.ш., 152°20'8" в.д.), Голубое (61° 06.690' с.ш., 152° 15.570' в.д.), Соседнее (62°03'29" с.ш., 149°31'22" в.д.), Сапог (63°29'9" с.ш., 147°50'41" в.д.), Водораздельное (63°44'8" с.ш., 148°13'4" в.д.), Уи (63°49'31" с.ш., 147°53'21" в.д.), Форель (63°50'01.61" с.ш., 147°51'03.75" в.д.). Большинство озер образовано в конце позднего плейстоцена или в начале раннего голоцена. Особенности осадконакопления в позднем плейстоцене и голоцене существенно различались. Позднеплейстоценовый этап характеризуется преобладанием терригенных отложений, в то время как в голоцене преобладает биогенное осадконакопление. Показаны ключевые биотические и абиотические индикаторы изменений природной среды в осадках ледниковых озер.

Ключевые слова: озерные осадки, голоцен, плейстоцен, природная среда

Для цитирования: Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Морозова М.А., Бурнатный С.С. Изменение природной среды на границе плейстоцена и голоцена в осадках ледниковых озер Северо-Востока России: результаты и перспективы исследований // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 463-468. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-463

1. Введение

Озера Магаданской области многочисленны (Измайлова, 2018). В зависимости от происхождения они подразделяются на пойменно-долинные, прибрежно-лагунные, ледниковые, ледниково-тектонические, термокарстовые (Электронный справочник «Озера России», <http://wp.limno.org.ru/win/ruslake.htm>). Ледниковые озера распространены в горных районах, большинство из них образовано в конце позднего плейстоцена-начале голоцена. В этой связи их осадки несут информацию о характере климатических изменений в течение последнего ледниково-межледникового цикла, включая глобальную перестройку природной среды на границе плейстоцена и голоцена. Интенсивный старт изучения озерных отложений региона начался в 90-е годы прошлого столетия. Полученные данные о возрасте осадков, условиях накопления, палинологической характеристике, палеогеографических реконструкциях изложены в многочисленных работах А.В. Ложкина, П.М. Андерсон с соавторами (Lozhkin

et al., 2016; 2024 и ссылки в них). Исследовались озера Эликчан-1,4, Алут, Эльгеня, Джек Лондона, Соседнее, Голубое, Щучье, Приятное, Джульетта, Смородиновое, Подкова, Лесное, Черное, Глухое и др. С 200-х годов исследования озерных осадков стали проводиться комплексно с применением петрофизических, геохимических, минералогических, литологических методов (Минюк и Пожидаева, 2023). Такой подход позволяет устанавливать реакцию всех компонентов природной среды, включая биотические и абиотические составляющие, на климатические изменения прошлого. Исследование источников сноса, сравнение результатов с данным по озерным осадкам способствует правильной интерпретации условий озерного седиментогенеза.

2. Объекты и методы исследований

Исследованы осадки озер Тальской группы – Грязевое (61°08'21" с.ш., 152°19'57" в.д.), Щучье (61° 08.780' с.ш., 152° 19.860' в.д.), Налимное (61°07'41"

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: minyuk@neisri.ru (П.С. Минюк)

Поступила: 19 мая 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



с.ш., 152°20'8" в.д.) и Голубое (61° 06.690' с.ш., 152° 15.570' в.д.), а также оз. Соседнее (62°03'29" с.ш., 149°31'22" в.д.), Сапог (63°29'9" с.ш., 147°50'41" в.д.), Водораздельное (63°44'8" с.ш., 148°13'4" в.д.), Уи (63°49'31" с.ш., 147°53'21" в.д.), Форель (63°50'01.61" с.ш., 147°51'03.75" в.д.). Данные озера имеют ледниковое происхождение, они расположены среди моренных отложений. Большинство из них образовано в конце позднего плейстоцена или в начале раннего голоцена. Вода в озерах ультрапресная, гидрокарбонатная с низкой минерализацией (< 50 мг/л). Озера мелководные, максимальные глубины отмечены в озерах Налимное (16 м), Сапог (14 м), Соседнее (13 м). В каждом озере пробурено несколько скважин, позволяющих выяснить характер заполнения озерных чаш осадками. Осадки представлены преимущественно алевритами. В верхней части разрезов доминируют органогенные неслоистые алевриты, в нижней залегают тонкослоистые, ленточные или неяснослоистые алевриты, песчано-гравийные отложения (Рис.). В осадках всех озер найдена тефра кальдеры Курильского озера с возрастом 7600 лет. Мощность изучаемых колонок составляет 780 см (Грязевое), 235 см (Налимное), 164 см (Голубое), 424 см (Соседнее), 100 см (Сапог), 196 см (Водораздельное), 199 см (Уи), 227 см (Форель). Осадки исследовались петрофизическими, геохимическими, палинологическими, диатомовым (оз. Грязевое), оптическими, минералогическими, терромагнитными методами.

3. Результаты и обсуждение

Условия седиментации в позднем плейстоцене и голоцене существенно отличались. Позднеплейстоценовый этап характеризуется

доминированием терригенного осадконакопления. Озерные осадки по многим геохимическим и петромагнитным параметрам схожи с отложениями источников сноса. Как правило, они характеризуются повышенными значениями магнитной восприимчивости (MB), остаточной намагниченности насыщения (Jrs), намагниченности насыщения (Js), низкой долей парамагнитной компоненты (Jp), низким содержанием органического вещества (LOI). Среди геохимических характеристик, преобладают детритовые компоненты – Al₂O₃, TiO₂, MgO. В окрестностях озер доминировала травянистая растительность, биопродуктивность водных бассейнов была низкой. Максимальные мощности плейстоценовых осадков отмечены в озерах Грязевое и Соседнее, которые, согласно радиоуглеродным датировкам, образовались около 22–26 тыс. лет тому назад. Климатическая перестройка в конце плейстоцена отразилась на всех биотических и абиотических параметрах осадка. Палинологические данные указывают на направленное потепление климата. В спорово-пыльцевых спектрах на смену травянистых растений приходят древесные и кустарниковые таксоны – *Betula*, *Alnus*, *Pinus* subgen. *Haploxyylon* и др. Накопление органического углерода (= LOI) начало постепенно увеличиваться в озерах, приводя к уменьшению скалярных магнитных характеристик (MB, Js, Jrs) осадков. Развитие диатомей обусловило накопление биогенного кремнезема, который также занижил величины магнитных параметров. Для оценки относительного содержания биогенного кремнезема сравнивали распределение SiO₂ и SiO₂/TiO₂ в осадках и в источниках сноса. В раннем голоцене отмечено хомогенное накопление высококоэрцитивных железосодержащих минералов, предположительно гидроксидов железа. На стадии

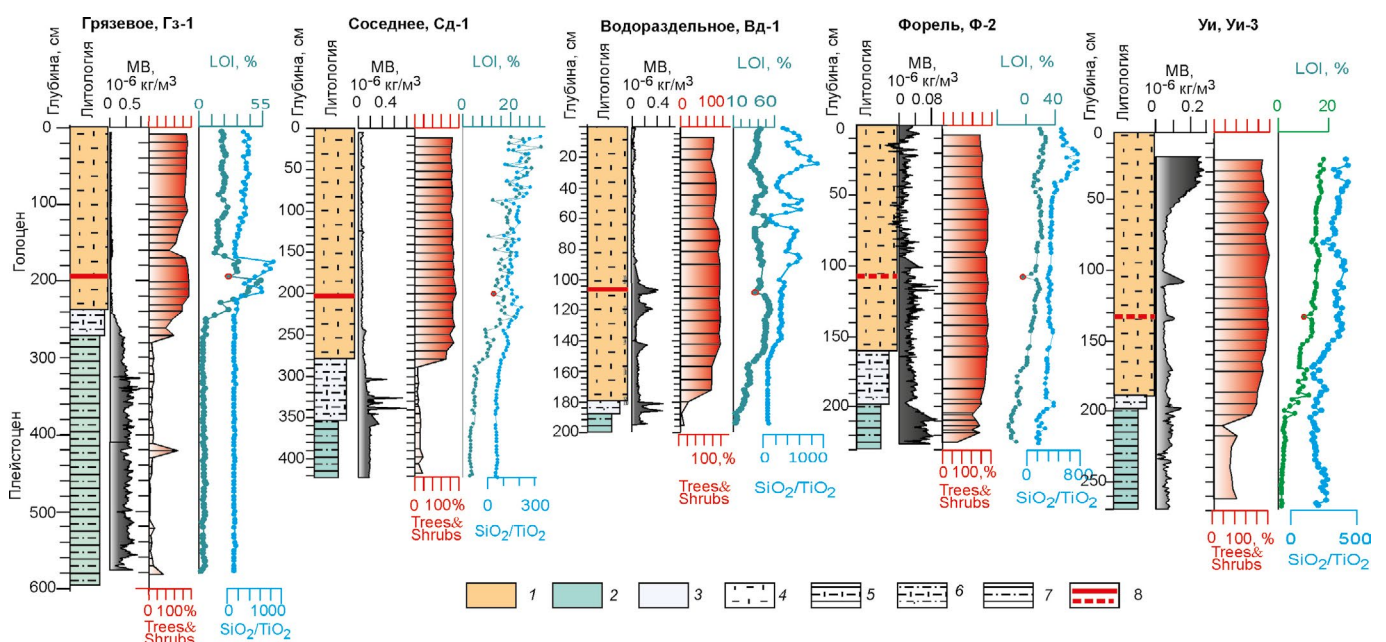


Рис. Литология, вариации MB, процентного содержания в спектрах деревьев и кустарников, органики (LOI), отношения LOI, SiO₂/TiO₂ в разрезах отдельных ледниковых озер: 1 – голоценовые осадки; 2 – позднеплейстоценовые осадки; 3 – переходные слои; 4 – органический неслоистый алеврит; 5 – органический слоистый алеврит; 6 – ленточный алеврит; 7 – слоистый алеврит; 8 – тефра.

диагенеза в осадках озер происходило образование аутигенных сульфидов железа – пирита, грейгита, пирротина, имеющих часто фрамбоидальное строение.

Озера прибрежных впадин отличаются от ледниковых озер по многим параметрам. Исследуются озера, расположенные в Ланковской (оз. Чистое, Лб-1, Лб-2, Корчан) и Кавинско-Тауйской (оз. Чукча, Безымянка) кайнозойских впадинах (Игнатова, 2007). Эти озера голоценового возраста. Мощность осадков в озерах Чукча и Чистое составляет около 10 м. Осадки относительно сильномагнитные, с однокомпонентной намагниченностью, малой доле органического вещества и являются хорошим объектом для исследования палеоэкологических вариаций геомагнитного поля и цикличности осадконакопления.

4. Выводы

Осадки ледниковых озер Северо-Востока России являются благоприятным объектом для исследования характера изменений природной среды на границе позднего плейстоцена и голоцена. Изменения природной среды зафиксированы как в наземной, так и водной системах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки № 121031700311-4.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Игнатова В.А. 2007. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности Ямско-Тауйского нефтегазоносного бассейна (Магаданская область). Геология нефти и газа 4: 2-12.

Измайлова А.В. 2018. Озерные водные ресурсы азиатской части Российской Федерации. Водные ресурсы 45: 453-462.

Минюк П.С., Пожидаева Д.К. 2023. Озера Тальской группы (Магаданская область) –перспективный объект для палеоклиматических реконструкций конца позднего плейстоцена и голоцена. Вестник Северо-Восточного научного центра 3: 18–35.

Lozhkin A.V., Brown T.A., Anderson P.M. et al. 2016. The Importance of Radiocarbon Dates and Tephra for Developing Chronologies of Holocene Environmental Changes from Lake Sediments, North Far East. Russian Journal of Pacific Geology 10: 249–262. DOI: [10.1134/S1819714016040047](https://doi.org/10.1134/S1819714016040047)

Lozhkin A.V., Anderson P.M., Tsygankova V.I. 2024. Palynological records from glacial lakes, northern Priokhotye (western Beringia). Quaternary International 681: 1–10. DOI: [10.1016/j.quaint.2023.12.011](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2023.12.011)

Litho- and biostratigraphy of the Holocene sediments in the southern part of Lake Ladoga



Kuznetsov D.D.*, Ludikova A.V., Revunova A.V.

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – SPC RAS, Sevastyanova str. 9, St. Petersburg 196105, Russia

ABSTRACT. We present the results of study sediment core, taken in the southern part of Lake Ladoga at the depth of 44 m. The sediments are gray silt with total thickness of 0.8 m. Diatom and loss-on-ignition and grain-size analyzes and radiocarbon dating were carried out. The retrieved sediments formed during the Holocene starting from the regression of the Ancylus Lake at the Baltic ca. 10,200 cal. BP. Changes in the composition of diatom assemblages and the dynamics of organic accumulation correspond to the typical scenarios that we recorded in the Holocene sediments in the central part of Lake Ladoga. No sedimentary hiatuses were recorded. Thus, it has been established that aquatic, relatively deep-water conditions existed in this part of the Ladoga basin starting from the Early Holocene with the accumulation of fine-grained sediments.

Keywords: the Holocene, Lake Ladoga, lake sediments, loss on ignition, diatom analyses

For citation: Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Revunova A.V. Litho- and biostratigraphy of the Holocene sediments in the southern part of Lake Ladoga // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 469-474. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-469

1. Introduction

Paleoreconstructions of the dynamics of the shoreline of Lake Ladoga and its environment in the Holocene have been carried out since the end of the 19th century (e.g. The history..., 1990). However, a number of unresolved issues still remain including the reconstruction of the sedimentation conditions that existed in the southern part of the Ladoga depression.

The southern part of Lake Ladoga is characterized by relatively shallow depths (up to 50 m). The surface sediments here are mainly represented by sands, gravel and pebbles (Subetto, 2009). Sediment studies carried out here in the late 1950s – early 1960s revealed the clays underlying the sands pollen-dated to the Early Holocene (Semenovich, 1966). However, later studies recorded sedimentary hiatuses in the sediment sequences in the southern part of the lake and concluded that subaerial conditions existed here in the first half of the Holocene (Lake..., 2002). The position of the southern coastline of Lake Ladoga during the Yoldia low-level stage of the Baltic Sea was drawn along the present 50-m isobath (ibid.). Lake Ladoga also experienced several transgressive stages. During the Ancylus transgression stage of the Baltic Sea (ca. 10,700-10,200 cal. BP) the lake-level rise to its present

level was suggested that ended with the level drop and drying of the southern part of the Ladoga bottom (The history..., 1990). According to other data, the lake-level rise only reached the present 20-m isobath (Lake..., 2002). The next high-level stage occurred in the second half of the Holocene when during the Ladoga transgression the southern coastal lowlands were flooded, and some researchers distinguish two stages of rise in lake level during this period (The history..., 1990). After the termination of the Ladoga transgression, ca. 3300 cal. BP, the level of Lake Ladoga dropped to its present 5 m above sea level.

Due to the existing uncertainty in the characteristics of sedimentation conditions in the southern part of the Ladoga basin, the works on the revision of this issue have been initiated. One of the objectives of the study included sediment sampling and characterization of the Early Holocene sediments in the southernmost parts of the basin.

2. Materials and methods

Sediment cores were collected in the southern part of Lake Ladoga in the summer of 2023 from the Poseidon Research Vessel using a gravity corer. At station 10, at a depth of 44 m, a core with a thickness

*Corresponding author.

E-mail address: dd.kuznetsov@mail.ru (D.D. Kuznetsov)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

Available online: August 26, 2024



of 0.8 m was retrieved. Loss-on-ignition (LOI), diatom and grain-size analyzes as well as radiocarbon dating using accelerator mass spectrometry were carried out. Species identification of the scales and bones of a fish found in the lowermost part of the sediment core was performed (Kuznetsov et al., 2023). Ignition was carried out at a temperature of 550°C for 6 hours. Due to the insufficient volume of material, grain-size analysis was only performed for a fine fraction of sediments (≤ 0.1 mm) using the pipette method.

3. Results and discussion

The results of radiocarbon dating showed that the sediment sequence covers most of the Holocene starting from the time of regression of Ancylus Lake ca. 10,200 cal. BP. The retrieved sediments are represented by gray sandy silt with the upper 10 cm being light brown and black. The average organic matter content was ca. 5% ranging from 2.2% to 8.7%. The lowest LOI values are typical for sediments of the Early Holocene. In the middle part of the section corresponding to the climatic optimum a notable peak in the organic matter content was recorded. In the second half of the Holocene, a sharp decrease in LOI values occurs. Similar patterns were previously identified in other sediment cores in Lake Ladoga (Kuznetsov and Subetto, 2021).

Based on the grain-size analysis the sediments were described as silts with variable admixture of fine sand and silty sand. The proportion of fine sand in the sediments of the first half of the Holocene is 13-42%, with an average value of 25%. In the second half of the Holocene, starting from 4000-3500 cal. BP synchronously with the decrease in organic matter content, the proportion of fine sand increases to 24-56% with an average value of 42%. The obtained radiocarbon dates suggest that these changes could be associated with the termination of the Mid-Holocene Ladoga transgression.

The Early Holocene sediments are characterized with a low diatom concentrations and a relatively high proportions of benthic diatoms, which is also typical for the other sediment sequences in Lake Ladoga (Kostrova et al., 2019; Ludikova and Kuznetsov, 2021). Subsequently, the diatom assemblages with an absolute predominance of planktonic *Aulacoseira islandica* formed and the diatom concentrations increased reflecting an improvement in climatic and environmental conditions, and together with an increase in the organic matter content indicating an increase in the productivity of the lake ecosystem. A further increase in the diatom concentrations and a co-dominance of planktonic *Aulacoseira subarctica* are characteristic for the sediments of the second half of the Holocene (Ludikova and Kuznetsov, 2021).

In the bottommost part of the sediments, fish vertebrae and scales belonging to the river perch (*Perca fluviatilis* L., 1758) were found (Kuznetsov et al., 2023). Perch is a cold-loving species and belongs to the earliest fish invaders of Lake Ladoga (The history..., 1998). The reconstructed size of the Early-Holocene specimen is comparable to the present one of the same age. The size of the perch is largely determined by its diet,

which includes various groups of organisms – crustaceans, insects, mollusks, fish (Sterligova et al., 2016). It can be suggested therefore that the composition of the Ladoga biota was quite diverse in the Early Holocene, and multi-level food chains could have formed.

4. Conclusions

The structure and composition of the studied sediments, the dynamics of organic accumulation that corresponds to the standard pattern for Lake Ladoga, and changes in the composition of diatom assemblages indicate the continuous sedimentation starting from the termination of the Ancylus transgression in the Early Holocene.

It can be argued therefore that in the considered part of the Ladoga basin aquatic, relatively deep-water conditions with the accumulation of fine-grained sediments existed in the Early Holocene.

Finding of the remains of the river perch in the Early Holocene sediments confirms the hypothesis of the early invasion of cold-loving fish species in the Ladoga basin.

The drop in the organic matter content observed synchronously with the onset of the increase in the proportion of fine sand fraction and roughly corresponds to the termination of the Mid-Holocene Ladoga transgression.

Acknowledgements

The study contributes to the State Research Program of the Institute of Limnology – SPC RAS (no FFZF-2024-0001). The authors express their gratitude to the captain and the crew of the Poseidon Research Vessel and all participants of the field and laboratory works for their help.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L. et al. 2019. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes. *Boreas* 48: 361-376. DOI:[10.1111/bor.12385](https://doi.org/10.1111/bor.12385)
- Kuznetsov D.D., Ludikova A.V., Askeev I.V. et al. 2023. Holocene sediments of the southern part of Lake Ladoga – survey of the 1960s, results of 2023 and a unique find of the Early Holocene perch. *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia* 10:377-380. DOI:[10.24412/2687-1092-2023-10-377-380](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-377-380) (in Russian)
- Kuznetsov D.D., Subetto D.A. 2021. Holocene organic sedimentation in Lake Ladoga. *Geomorfologiya* 52(2): 63-71. DOI:[10.31857/S043542812102005X](https://doi.org/10.31857/S043542812102005X) (in Russian)
- Lake Ladoga. Past, present and future. 2002. Saint-Petersburg: Nauka Publ. (in Russian)
- Ludikova A.V., Kuznetsov D.D. 2021. Siliceous microalgae in the Lake Ladoga sediments and their significance in paleolimnological reconstructions. *Izvestia RGO [Proceedings of Russian Geographical Society]* 153(6): 46-64. DOI:[10.31857/S0869607121060033](https://doi.org/10.31857/S0869607121060033) (in Russian)

Semenovich N.I. 1966. Bottom sediments of Lake Ladoga. Moscow-Leningrad: Nauka Publ. (in Russian)

Sterligova O.P., Il'mast N.V., Savosin D.S. 2016. Perch *Perca fluviatilis* (Percidae) in different types of Karelian water bodies. *Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Obshchaya biologiya* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Biology] 2(155): 57-62. (in Russian)

Subetto D.A. 2009. Lake sediments: paleolimnological reconstructions. Saint-Petersburg, Herzen University Publ. (in Russian)

The history of Lakes Ladoga, Onega, Pskov-Chudskoye, Baikal and Khanka. 1990. Leningrad: Nauka Publ. (in Russian)

The history of pleistocene lakes of the East European plain. 1998. Saint-Petersburg: Nauka Publ. (in Russian)

Лито- и биостратиграфия голоценовых отложений южной части Ладожского озера



Кузнецов Д.Д.* , Лудикова А.В., Ревунова А.В.

Институт озероведения – СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, С.-Петербург 196105, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследована колонка донных отложений Ладожского озера, отобранная в южной части акватории с глубины 44 м. Отложения представлены серым алевритом. Общая мощность составила 0,8 м. Проведены диатомовый, гранулометрический анализы, радиоуглеродное датирование, определены потери при прокаливании. Вскрытые отложения формировались на протяжении голоцена, начиная со времени регрессии Анцилового озера около 10200 кал. л.н. Изменения в составе диатомовых комплексов и динамика органонакопления соответствует типичному сценарию, фиксируемому нами в голоценовых отложениях центральной части Ладожского озера. Перерыв осадконакопления не обнаружено. Таким образом установлено, что в рассматриваемой части котловины Ладожского озера в раннем голоцене существовали субаквальные, сравнительно глубоководные условия с накоплением тонкоразмерных осадков.

Ключевые слова: голоцен, Ладожское озеро, озерные отложения, потери при прокаливании, диатомовый анализ

Для цитирования: Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В., Ревунова А.В. Лито- и биостратиграфия голоценовых отложений южной части Ладожского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 469-474. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-469

1. Введение

Палеорекострукции динамики береговой линии Ладожского озера и параметров его среды в голоцене проводятся, начиная с конца XIX в. (напр. История..., 1990). К настоящему времени остался ряд нерешенных вопросов, среди которых реконструкция условий осадконакопления, существовавших в южной части современной акватории.

Южная часть Ладожского озера характеризуется относительно небольшими глубинами (до 50 м). Поверхность отложений здесь сложена преимущественно песчаными и гравийно-галечными осадками (Субетто, 2009). В ходе работ, проводившихся здесь в конце 1950-х – начале 1960-х гг. вскрытые под песками глинистые отложения были датированы по данным спорово-пыльцевого анализа раннеголоценовым возрастом (Семенович, 1966). Однако в более поздних работах отмечается перерыв в осадконакоплении в отложениях южной части озера и делается вывод о существовании здесь в первой половине голоцена субаэральных условий (Ладожское..., 2002). Положение береговой линии Ладожского озера на юге во время иольдиевой стадии Балтийского моря проводится

по современной изобате около 50 м (там же). В истории озера отмечается несколько трансгрессивных эпизодов. Подъем уровня до современных отметок в стадию анциловой трансгрессии Балтики (около 10700-10200 кал. л.н.) закончился спадом и осушением южной части современной акватории (История..., 1990). По другим данным этот подъем достигал только современной 20-метровой изобаты (Ладожское..., 2002). Второй подъем уровня происходил во второй половине голоцена, когда в ходе ладожской трансгрессии произошло затопление южных прибрежных низменностей, причем некоторыми исследователями в этот период выделяется два этапа подъема уровня (История..., 1990). После завершения ладожской трансгрессии около 3300 кал. л.н., уровень Ладожского озера понизился до современных 5 м над у.м.

В связи с имеющейся неопределенностью в характеристике условий осадконакопления для данной части акватории нами начаты работы по ревизии этого вопроса. Одной из целей исследования является отбор и характеристика раннеголоценовых отложений в наиболее южных частях котловины.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dd.kuznetsov@mail.ru (Д.Д. Кузнецов)

Поступила: 05 июня 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Колонки донных отложений были отобраны в южной части Ладожского озера летом 2023 г. с борта НИС Посейдон гравитационной трубкой системы ГОИН. На станции 10 на глубине 44 м отобрана колонка мощностью 0,8 м. Определены потери при прокаливании, проведены диатомовый и гранулометрический анализы, радиоуглеродное датирование с использованием ускорительной масс-спектрометрии, определение видовой принадлежности рыбы, чешуя и кости, которой были обнаружены в нижней части отложений (Кузнецов и др., 2023). Прокалывание проводилось при температуре 550°C в течение 6 часов. Гранулометрический анализ из-за недостаточного объема материала проводился только для тонкой фракции отложений (для фракции менее 0,1 мм) пипеточным методом.

3. Результаты и обсуждение

Результаты радиоуглеродного датирования показали, что полученная колонка охватывает большую часть голоцена, начиная со времени регрессии Анцилового озера около 10200 кал. л.н. Вскрытые отложения представлены серым опесчаненным алевритом, верхние 10 см светло-бурого и черного цвета. Содержание органического вещества составило в среднем около 5%, при диапазоне значений 2,2-8,7%. Самые низкие значения ППП характерны для осадков раннего голоцена. В средней части разреза, соответствующей эпохе климатического оптимума отмечен четко выраженный пик содержания органического вещества. Во второй половине голоцена происходит резкое снижение значений ППП. Подобные закономерности ранее отмечались в других колонках ладожских отложений (Кузнецов и Субетто, 2021).

Гранулометрический анализ позволил охарактеризовать исследованные отложения как песчаные и песчанистые алевриты и алевритовый песок. При этом в отложениях первой половины голоцена доля тонкого песка составляет 13-42%, при среднем значении 25%. Во второй половине голоцена, начиная с 4000-3500 кал. л.н. параллельно с уменьшением содержания органического вещества, содержание тонкого песка увеличивается до 24-56% при среднем значении 42%. Полученный возраст позволяет предположить, что данные изменения могли быть связаны с завершением среднеголоценовой ладожской трансгрессии.

Отложения раннего голоцена характеризуются низким содержанием створок диатомовых водорослей, и сравнительно высокой долей диатомей бентоса, что характерно и для других разрезов ладожских осадков (Лудикова и Кузнецов, 2021; Kostrova et al., 2019). Впоследствии формируются монодоминантные диатомовые комплексы с абсолютным преобладанием планктонной *Aulacoseira islandica*, увеличиваются концентрации створок диатомей, отражающие улучшение природно-климатических обстановок и вместе с увеличением

содержания органического вещества свидетельствующие о повышении продуктивности экосистемы. Дальнейший рост содержания створок диатомей в осадках и появление планктонной *Aulacoseira subarctica* в качестве со-доминанта характерно для осадков второй половины голоцена (Лудикова и Кузнецов, 2021).

В отложениях, залегающих в основании разреза обнаружены фрагменты рыбы: позвонки и чешуя речного окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758) (Кузнецов и др., 2023). Окунь является холодолюбивой формой и относится к первым вселенцам Ладожского озера (История озер..., 1998). Реконструированный размер раннеголоценовой особи сопоставим с таковым для современного окуня такого же возраста. Размер окуня в значительной степени обусловлен питанием, которое включает в себя разнообразные группы организмов – ракообразных, насекомых, моллюсков, рыб (Стерлигова и др., 2016). Вероятно, можно говорить о том, что в раннеголоценовое время состав ладожской биоты был достаточно разнообразным, что позволяло существовать многоуровневым пищевым цепям.

4. Заключение

Строение и состав исследованной колонки донных отложений, динамика органонакопления, соответствующая стандартному ходу накопления органического вещества для Ладожского озера, и изменения в составе диатомовых комплексов свидетельствуют об отсутствии перерывов осадконакопления, начиная со времени завершения анциловой трансгрессии в раннем голоцене.

Можно утверждать, что в рассматриваемой части котловины Ладожского озера в раннем голоцене существовали субаквальные, сравнительно глубоководные условия с накоплением тонкоразмерных осадков.

Находка остатков речного окуня в отложениях указанного периода подтверждает гипотезу о раннем заселении холодолюбивых видов рыб в ладожский бассейн.

Падение содержания органического вещества синхронно с началом роста содержания тонкопесчаной фракции и датируется приблизительно периодом завершения ладожской трансгрессии.

Благодарности

Исследование осуществлено при поддержке государственной программы ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (FFZF-2024-0001). Авторы выражают глубокую благодарность капитану и команде НИС Посейдон и всем участникам полевых и лабораторных работ за их помощь

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки. 1990. Л.: Наука. 280 с.

История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. 1998. СПб.: Наука. 406 с.

Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В., Аськеев И.В. и др. 2023. Донные отложения южной части Ладожского озера: результаты исследований 1960-х гг., новые данные и уникальная находка остатков раннеголоценового окуня. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России 10: 377-380. DOI: [10.24412/2687-1092-2023-10-377-380](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-377-380)

Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. 2021. Голоценовое накопление органического вещества в донных отложениях Ладожского озера. Геоморфология 52(2): 63-71. doi:[10.31857/S043542812102005X](https://doi.org/10.31857/S043542812102005X)

Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. 2002. СПб.: Наука. 327 с.

Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. 2021. Кремнистые микроводоросли в донных отложениях Ладожского озера и их роль в палеолимнологических реконструкциях. Известия РГО 153(6): 46-64. doi: [10.31857/S0869607121060033](https://doi.org/10.31857/S0869607121060033)

Семенович Н.И. 1966. Донные отложения Ладожского озера. М.-Л.: Наука. 124 с.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Савосин Д.С. 2016. Окунь *Perca fluviatilis* (Percidae) разнотипных водоемов Карелии. Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Общая биология 2(155): 57-62.

Субетто Д.А. 2009. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена. 339 с.

Kostrova S.S., Meyer H., Bailey H.L. et al. 2019. Holocene hydrological variability of Lake Ladoga, northwest Russia, as inferred from diatom oxygen isotopes. *Boreas* 48: 361-376. DOI: [10.1111/bor.12385](https://doi.org/10.1111/bor.12385)

Iron sulfides in sediments of glacial lakes of the upper Kolyma region

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Minyuk P.S.*, Pozhidaeva D.K., Sotskaya O.T.

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute N.A. Shilo FEB RAS, 16 Portovaya str., Magadan, 685000, Russia

ABSTRACT. Iron sulfides are common in the sediments of glacier lakes of the Magadan region -Gryazevoe (61°08'21" N, 152°19'57" E), Nalimnoe (61°07'41" N, 152°20'8" E), Sosednee (62°03'29" N, 149°31'22" E), Sapog (63°29'9" N, 147°50'41" E), Vodorazdel'noe (63°44'8" N, 148°13'4" E), Ui (63°49'31" N, 147°53'21" E) and others. Most of the lakes were formed at the end of the Late Pleistocene or at the beginning of the Early Holocene. Sulfides occur in the spheroid forms with a framboidal structure, dusty clusters, and individual crystals. Sometimes sulfides fill up the diatom valves. The size of framboids does not exceed 100 μm. Sulfides have pyrite, greigite and pyrrhotite compositions. They are distributed unevenly in sections. Greigite and pyrrhotite are distinguished by their magnetic characteristics.

Keywords: lake sediments, pyrite, greigite, pyrrhotite, Holocene, Pleistocene

For citation: Minyuk P.S., Pozhidaeva D.K., Sotskaya O.T. Iron sulfides in sediments of glacial lakes of the upper Kolyma region // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 475-480. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-475

1. Introduction

Iron sulfides are widespread minerals in lake sediments. They are indicators of anoxic environments. In lakes, they are formed in sediment at the stage of diagenesis, and also occur in the water column above the sediment-water boundary (Wilkin and Barnes, 1997; Suits and Wilkin, 1998). Pyrite (FeS₂) and greigite (Fe₃S₄) are most common in sediments. Pyrite is a non-magnetic mineral, however, during heating it turns into magnetite, complicating the identification of the characteristic directions of magnetization. Greigite is a highly magnetic mineral (Roberts et al., 2011). Formed at the stage of diagenesis, it distorts the rock magnetic data of detrital magnetic minerals, which used for reconstructions of lake sedimentation. Monoclinic pyrrhotite is rarely found in sedimentary deposits (Roberts, 2015).

2. Materials and methods

Iron sulfides were found in the sediments of glacier lakes of the Magadan region -Gryazevoe (61°08'21" N, 152°19'57" E), Nalimnoe (61°07'41" N, 152°20'8" E), Sosednee (62°03'29" N, 149°31'22" E), Sapog (63°29'9" N, 147°50'41" E), Vodorazdel'noe

(63°44'8" N, 148°13'4" E), Ui (63°49'31" N, 147°53'21" E) The lakes are of glacial origin, most of the lakes were formed at the end of the Late Pleistocene or at the beginning of the Early Holocene. Several cores have been taken in each lake. The sediments mainly consist of silt. Organic silt dominates in the upper part of the sections, thin-layered, varved or obscurely layered silt lie in the lower part. The thickness of the studied cores is 780 cm (Gryazevoe), 235 cm (Nalimnoe), 424 cm (Sosednee), 100 cm (Sapog), 196 cm (Vodorazdel'noe), 199 cm (U).

Sulfide minerals were studied by thermomagnetic, optical and mineralogical methods. Thermomagnetic analysis (TMA) was performed using MFK1-FA Kappabridge equipped with a CS-3 high temperature furnace (AGICO Ltd.) and a Curie express balance (Burov et al., 1986). Hysteresis parameters were measured by an automatic coercive spectrometer (Burov et al. 1986). The elemental composition of sulfides was carried out on an EVO-50 scanning electron microscope with Bruker AXS XFlash energy dispersion spectrometers and the Quantax Esprite 1.9 X-ray microanalysis system, as well as on a Camebax microanalyzer with an X-Max energy dispersion detector, Oxford (INCA, Aztec).

*Corresponding author.

E-mail address: minyuk@neisri.ru (P.S. Minyuk)

Received: May 20, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



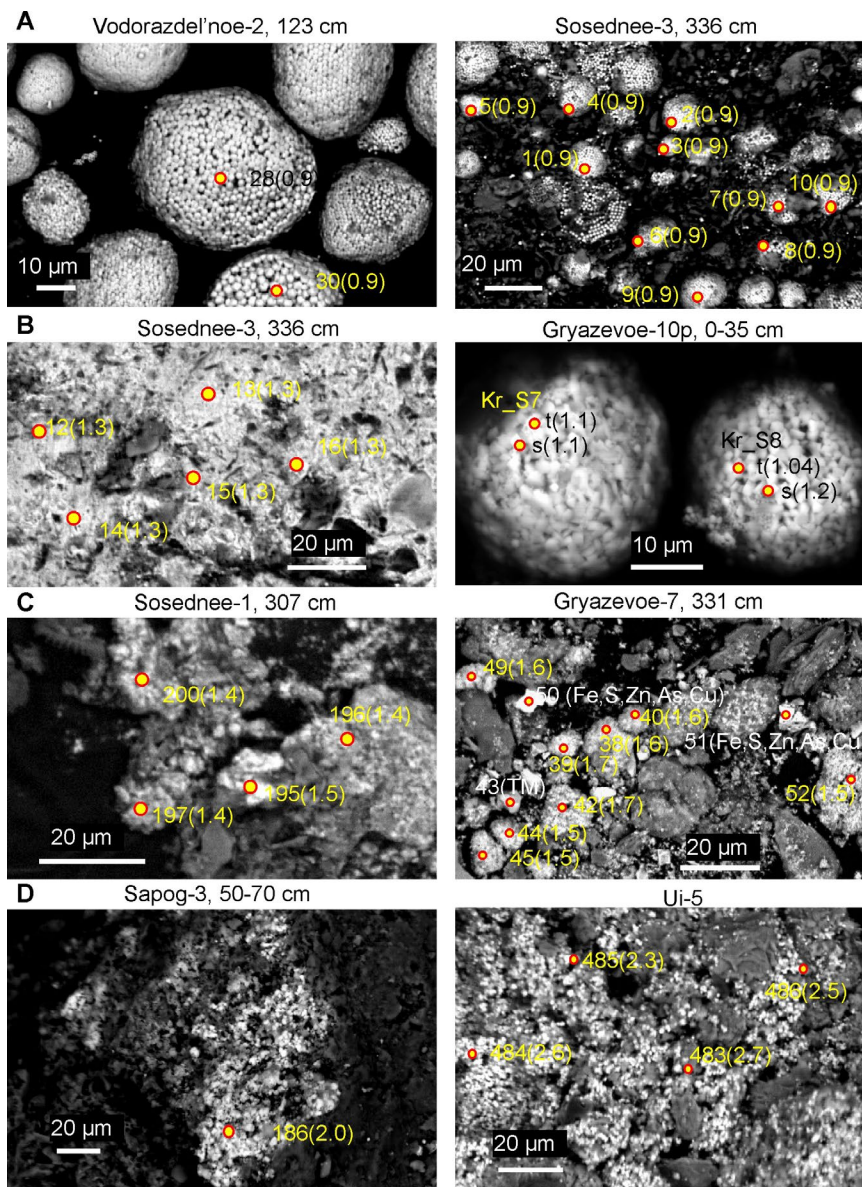


Fig. Photomicrographs of magnetic fractions (BSE images): sulfides of pyrite (A), greigite (B), pyrrhotite (C) composition. D – sulfides with Fe/S > 2. TM -titanomagnetite.

3. Results and discussion

Iron sulfides in the sediments of the studied lakes are in various forms – framboids, small dusty clusters, individual crystals (Fig.). Framboids look like opaque spherules of various sizes in transmitted light. They are often destroyed to a dark dusty mass (individual crystals) during the preparation of slides. Sometimes sulfides fill up the diatom valves. Some are in the form of chains; it is assumed that they are magnetic.

The numbers are indicated EDS analyses, in brackets are Fe/S ratios.

The distribution of sulfides along the cores is not uniform. In general, sulfides are confined to the lower parts of the sections, although they are found in small quantities in all sections of the studied cores. Sulfides are found mainly in the Holocene sediments of Gryazevoe and Nalimnoe lakes. Both of these lakes belong to the Talaya group of lakes.

The composition of sulfide minerals is not homogeneous. According to energy dispersion X-ray spectroscopy, in most cases they have a pyrite composition,

often of a framboidal structure. The ratio Fe (wt. %)/S (wt.%) is about 0.9. The size of the spheres varies from a few to 50 μm. They are numerous in the sediments of lakes Gryazevoe, Nalimnoe, Sosednee, Vodorazdel'noe, Sapog.

Some sulfides have a greigite composition (Fe/S ~ 1.2). They are found in the form of framboids and granular clusters. Pyrrhotite sulfides (Fe/S ~ 1.5) are less common. Sulfides in which the weight content of iron significantly exceeds the sulfur content (Fe/S > 2) have been noted in the sediments of many cores. According to the hysteresis data, magnetic sulfides are single-domain. The TMA curves of the magnetic extract show a decrease in magnetic susceptibility of about 400 °C, corresponding to greigite. Curie point (320°C) of pyrrhotite is visible on TMA curves after processing magnetic extract of 10% HCl. It is assumed that iron sulfides are formed mainly at the stage of diagenesis. Sulfides occur in the form of thin layers, possibly deposited directly from the water column in the Sosednee lake. The V/Cr ratio for the lower part of core

is >2 , indicating oxygen-free conditions in the basin. The water of the studied lakes is ultra-fresh, bicarbonate – dissolved solids is 20.4-49.3 mg/l. The content of the SO_4 anion is insignificant: 0.35 (Gryazevoe); 0.62 (Vodorazdel'noe); 1.04 (Ui); 0.61 (Sosednee); 0.87 mg/l (Nalimnoe). It is assumed that hydrogen sulfide, necessary for the formation of sulfides, was released during the decomposition of organic matter (Roberts, 2015).

4. Conclusions

Iron sulfides from lake sediments have pyrite, greigite and pyrrhotite compositions. They affect the magnetic characteristics of sediments, making it difficult to interpret the rock magnetic data for paleoclimatic reconstructions.

Acknowledgements

The study was carried out within the State Task No. 121031700311-4.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

References

- Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. 1986. Paleomagnetic analysis. Kazan: KSU (in Russian).
- Roberts A.P. 2015. Magnetic mineral diagenesis. *Earth-Science Reviews* 151: 1–47. DOI: [10.1016/j.earscirev.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.010)
- Roberts A.P., Chang L.A., Rowan C.J. et al. 2011. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4): an update. *Reviews of Geophysics* 49: RG1002. DOI: [10.1029/2010RG000336](https://doi.org/10.1029/2010RG000336)
- Suits N.S., Wilkin R.T. 1998. Pyrite formation in the water column and sediments of meromictic lake. *Geology* 26: 1099–1102. DOI: [10.1130/0091-7613\(1998\)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2)
- Wilkin R.T., Barnes H.L. 1997. Pyrite formation in an anoxic estuarine basin. *American Journal of Science* 297: 620–650. DOI: [10.2475/ajs.297.6.620](https://doi.org/10.2475/ajs.297.6.620)

Сульфиды железа в осадках ледниковых озер верховьев Колымы

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Минюк П.С.*, Пожидаева Д.К., Соцкая О.Т.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая 16, Магадан, 685000, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследованы сульфиды железа из осадков ледниковых озер Магаданской области - Грязевое (61°08'21" с.ш., 152°19'57" в.д.), Налимное (61°07'41" с.ш., 152°20'8" в.д.), Соседнее (62°03'29" с.ш., 149°31'22" в.д.), Сапог (63°29'9" с.ш., 147°50'41" в.д.), Водораздельное (63°44'8" с.ш., 148°13'4" в.д.), Уи (63°49'31" с.ш., 147°53'21" в.д.). Большинство озер образовано в конце позднего плейстоцена или в начале раннего голоцена. Сульфиды находятся в виде отдельных сфероидов, имеющих фрамбоидальную структуру, пылеватых скоплений, отдельных кристаллов. Иногда выполняют створки диатомей. Размер фрамбоидов не превышает 100 мкм. Сульфиды имеют пиритовый, грейгитовый и пирротиновый состав. Они распространены неравномерно в разрезах. Грейгит и пирротин выделяются по магнитным характеристикам.

Ключевые слова: озерные осадки, пирит, грейгит, пирротин, голоцен, плейстоцен

Для цитирования: Минюк П.С., Пожидаева Д.К., Соцкая О.Т. Сульфиды железа в осадках ледниковых озер верховьев Колымы // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 475-480. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-475

1. Введение

Сульфиды железа широко распространенные минералы в озерных осадках. Часто они являются индикаторами аноксидных обстановок. В озерах они образуются в осадке на стадии диагенеза, а также отмечаются в водной толще выше границы осадок-вода (Wilkin and Barnes, 1997; Suits and Wilkin, 1998). Наиболее часто в осадках встречаются пирит (FeS_2) и грейгит (Fe_3S_4). Пирит немагнитный минерал, однако в процессе нагрева переходит в магнетит, осложняя проведение терморазмагничивания образцов для выделения характеристических направлений намагниченности при палеомагнитных исследованиях. Грейгит сильномагнитный минерал (Roberts et al., 2011). Образуюсь на стадии диагенеза, он искажает петромагнитные характеристики детритовых магнитных минералов, часто используемых для реконструкций озерного осадконакопления. Моноклинный пирротин редко встречается в осадочных отложениях (Roberts, 2015).

2. Объекты и методы исследований

Сульфиды железа обнаружены в осадках ледниковых озер Магаданской области – Грязевое

(61°08'21" с.ш., 152°19'57" в.д.), Налимное (61°07'41" с.ш., 152°20'8" в.д.), Соседнее (62°03'29" с.ш., 149°31'22" в.д.), Сапог (63°29'9" с.ш., 147°50'41" в.д.), Водораздельное (63°44'8" с.ш., 148°13'4" в.д.), Уи (63°49'31" с.ш., 147°53'21" в.д.). Озера имеют ледниковое происхождение, большинство из них образовано в конце позднего плейстоцена или в начале раннего голоцена. В каждом озере пробурено несколько скважин. Осадки представлены преимущественно алевритами. В верхней части разрезов доминируют органогенные неслоистые алевриты, в нижней залегают тонкослоистые, ленточные или неясно слоистые алевриты. Мощность изученных колонок составляет 780 см (Грязевое), 235 см (Налимное), 424 см (Соседнее), 100 см Сапог), 196 см (Водораздельное), 199 см (Уи).

Сульфидные минералы исследовались термомангнитными, оптическими и минералогическими методами. Термомангнитный анализ (ТМА) проведен на многофункциональном каппаметре MFК1-FA с термоприставкой CS-3 (AGICO) и на магнитных весах (Буров и др., 1986), гистерезисные характеристики измерены на автоматическом коэрцитиметре J-meter (КТУ) (Буров и др., 1986). Исследования элементного состава тяжелой и магнитной фракций проведены на сканирующем электронном микро-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: minyuk@neisri.ru (П.С. Минюк)

Поступила: 20 мая 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



скопе EVO-50 с энерго-дисперсионными спектрометрами AXS XFlash фирмы Bruker и системой рентгеновского микроанализа Quantax Esprite 1.9, а также на микроанализаторе Camebax с энергодисперсионным детектором X-Max, Oxford (INCA, Aztec).

3. Результаты и дискуссия

Сульфиды железа в осадках исследованных озер находятся в различных формах – фрамбоидах, мелких пылеватых скоплениях, отдельных кристаллов (Рис.). Фрамбоиды в проходящем свете выглядят как непрозрачные сферулы различного размера. Они часто разрушены до темной пылевой массы (отдельных кристаллов) в процессе приготовления слайдов. Иногда сульфидные образования заполняют створки диатомей. Некоторые находятся в виде цепочек, предполагается, что они магнитные.

Распределение сульфидов по разрезам скважин не равномерное. В целом, наблюдается приу-

роченность сульфидов к нижним частям разрезов, хотя они в незначительных количествах встречаются по вертикали всех разрезов изученных скважин. В осадках озер Грязевое, Налимное сульфиды найдены, в основном, в голоценовой части разрезов. Оба этих озера принадлежат Тальской группе озер.

Состав сульфидных образований не однородный. По данным энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) они в большинстве случаев имеют пиритовый состав, часто фрамбоидального строения. Отношение Fe (мас. %)/S (мас. %) составляет около 0.9. Размер сферул изменяется от нескольких до 50 мкм. Они многочисленны в осадках озер Грязевое, Налимное, Соседнее, Водораздельное, Сапог.

Часть сульфидных образований имеет грейгитовый состав (Fe/S ~1.2). Они обнаружены в виде фрамбоидов и зернистых скоплений. Реже встречаются сульфиды пирротинового состава (Fe/S ~1.5). В осадках многих скважин отмечены сульфидные образования, в которых весовое содержание железа

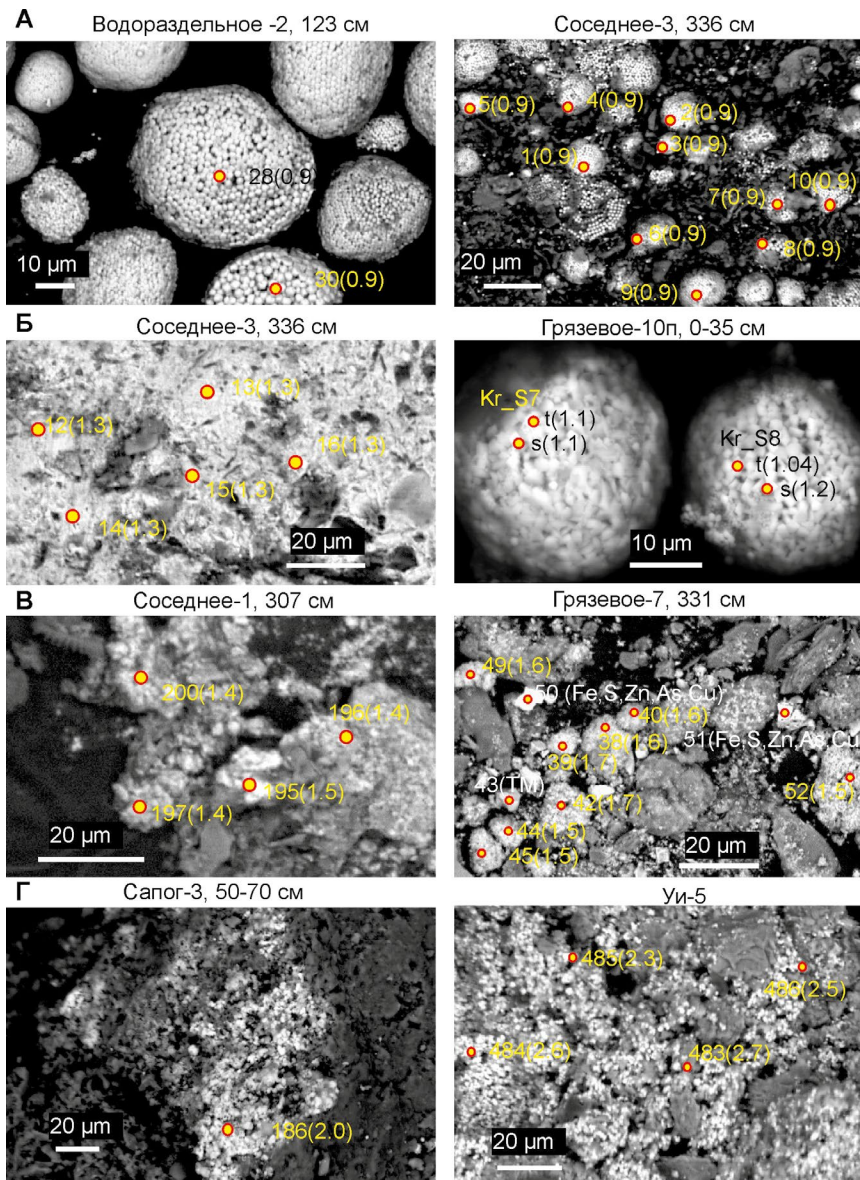


Рис. Микрофотографии магнитных фракций (изображения в обратно-рассеянных электронах): сульфиды пиритового (А), грейгитового (Б), пирротинового (В) состава; Г – сульфиды с Fe/S > 2. ТМ – титаномагнетит, цифрами показаны номера ЭДС спектров, в скобках – (отношения Fe/S).

значительно превышает содержание серы ($Fe/S > 2$). Судя по гистерезисным характеристикам магнитные сульфиды однодоменные. На кривых ТМА магнитных фракций фиксируется спад магнитной восприимчивости около $400^{\circ}C$, соответствующий грейгиту. Пирротин с точкой Кюри $320^{\circ}C$ отчетливо выражен на кривых термокаппетрии после обработки проб 10% HCl. Предполагается, что сульфиды железа образованы преимущественно на стадии диагенеза. В озере Соседне сульфидные образования отмечены в виде тонких слоев, возможно, осажденных непосредственно из водной тощи. Отношение V/Cr для нижней части разреза составляет > 2 , указывая на бескислородные условия в бассейне. Вода исследованных озер ультрапресная, гидрокарбонатная – общая минерализация составляет 20.4-49.3 мг/л. Содержание аниона SO_4 незначительное: 0.35 (Грязевое); 0.62 (Водораздельное); 1.04 (Уи); 0.61 (Соседнее); 0.87 мг/л (Налимное). Предполагается, что сероводород, необходимый для образования сульфидов, освобождался при разложении органики (Roberts, 2015).

4. Заключение.

Сульфидные образования из озерных осадков имеют пиритовый, грейгитовый и пирротинный состав. Они влияют на магнитные характеристики осадков затрудняя интерпретацию петрофизических данных, используемых для палеоклиматических реконструкций.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки № 121031700311-4.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Буров Б.В., Нурғалиев Д.К., Ясонов П.Г. 1986. Палеомагнитный анализ. Казань: КГУ.
- Roberts A.P. 2015. Magnetic mineral diagenesis. *Earth-Science Reviews* 151: 1–47. DOI: [10.1016/j.earscirev.2015.09.010](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.010)
- Roberts A.P., Chang L.A., Rowan C.J. et al. 2011. Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe_3S_4): an update. *Reviews of Geophysics* 49: RG1002. DOI: [10.1029/2010RG000336](https://doi.org/10.1029/2010RG000336)
- Suits N.S., Wilkin R.T. 1998. Pyrite formation in the water column and sediments of meromictic lake. *Geology* 26: 1099–1102. DOI: [10.1130/0091-7613\(1998\)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1099:PFITWC>2.3.CO;2)
- Wilkin R.T., Barnes H.L. 1997. Pyrite formation in an anoxic estuarine basin. *American Journal of Science* 297: 620–650. DOI: [10.2475/ajs.297.6.620](https://doi.org/10.2475/ajs.297.6.620)

Palaeoecological reconstruction of the Late Glacial and Early Holocene based on pollen data from lake Novozhilovo (Perm region, Russia)



Lapteva E.G.^{1,2*}, Rudaya N.A.³, Zaretskaya N.E.^{4,5}, Kopytov S.V.^{1,6}, Sannikov P.Yu.⁶

¹ Perm State Humanitarian Pedagogical University, Sibirskaya str., 24, Perm, 614990, Russia

² Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 8 Marta str., 202, Yekaterinburg, 620144, Russia

³ Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentyev prospect, 17, Novosibirsk, 630090, Russia

⁴ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Pereulok, 29, Moscow 119017, Russia

⁵ Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Pyzhevskiy Pereulok, 7, Moscow 119017, Russia

⁶ Perm State University, Bukireva str., 15, Perm 614990, Russia

ABSTRACT. This paper provides the first paleolimnological studies performed in the upper Kama basin (Perm region). These yielded a detailed pollen record characterizing the changes in the natural conditions of the transition from the periglacial environment of the Late Glacial period to the interglacial conditions of the Holocene between 14.15 and 10.0 cal ka BP. It was found that open birch woodland with larch existed in the Allerød period (14.15–12.7 cal ka BP) and was replaced by larch forest-steppe during the Younger Dryas (12.7–11.5 cal ka BP). The spread of spruce began in the early Holocene between 11.5 and 10.7 cal ka BP, whereas open larch and spruce woodlands became dominant between 10.7 and 10.0 cal ka BP. Quantitative palaeoclimatic reconstruction reveals that the average temperature of the warmest month (July) and the annual precipitation were considerably lower than modern values. The average July temperature increased from 10 to 16°C between 14.15 and 12.7 cal ka BP. Then, small fluctuations within 1°C occurred between 12.7 and 10.0 cal ka BP. The average annual precipitation was 200-300 mm below modern values between 14.15 and 10.7 cal ka BP and reached them only after 10.7 cal ka BP.

Keywords: paleoecology, palynology, North-East of the East European Plain, Allerød, Younger Dryas, early Holocene

For citation: Lapteva E.G., Rudaya N.A., Zaretskaya N.E., Kopytov S.V., Sannikov P.Yu. Palaeoecological reconstruction of the Late Glacial and Early Holocene based on pollen data from lake Novozhilovo (Perm region, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 481-486. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-481

1. Introduction

We have performed the first studies of the lacustrine deposits in the upper Kama basin. Previously, only few palaeoecological data were obtained for this area (Nazarov et al., 2020; Demakov et al., 2023; Lapteva et al., 2023). The purpose of this study is to reconstruct the dynamics of vegetation and climate in the upper Kama basin during the Late Glacial period and early Holocene using a detailed pollen record from the Lake Novozhilovo deposits.

2. Materials and methods

The NZH-1 core (60°19'18.5"N, 55°25'15.6"E) of 5.2 m thick was taken using the Livingstone coring equipment in 2022-2023 during winter time (see

Kopytov et al., 2024 in this issue). We selected 102 samples 2-5 cm thick for laboratory pollen analysis. Processing of the samples was performed according to the standard method (Faegri and Iversen, 1975). The biomes were reconstructed following the methods in Prentice et al., 1996. Palaeoclimatic parameters for the average temperature of the warmest month (July) and annual precipitation were calculated using transfer functions and following the weighted averaging partial least squares (WA-PLS) method (Juggins, 2007, Cao et al., 2020).

3. Results

The lithological and radiocarbon analyses show that gyttja deposits at depths of 5.2–3.5 m accumulated

*Corresponding author.

E-mail address: lapteva@ipae.uran.ru (E.G. Lapteva)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



in the Late Glacial period and early Holocene between ~14.15 and 10.0 cal ka BP (see Kopytov et al., 2024 in this issue). The changes in the taxonomic composition and pollen content indicate two groups of pollen spectra typical of this period. The first group (5.2–4.0 m, 14.15–10.7 cal ka BP) is dominated by pollen of herbaceous plants (approximately 60%) and shrubs (18–75%), mainly dwarf birch (*Betula* sect. *Apterocaryon* = *B.* sect. *Nanae*, 15–70%) and sagebrush (*Artemisia*, 25–45%) with tree birch (*Betula* sect. *Betula* = *B.* sect. *Albae*, 10–30%) and sporadic occurrence of larch pollen and stomata (*Larix*). Pollen from other coniferous species (*Picea*, *Pinus*) is wind-drifted, as indicated by its content of less than 5%. The second group (4.0–3.5 m, after 10.7 cal ka BP) is dominated by arboreal pollen (70–82%). The pollen spectra reflect a decrease in the percentage of dwarf birch (less than 15%) and sagebrush (5–10%). There is a maximum of spruce (*Picea*, up to 55%), while larch is also present. Stomata of these coniferous trees were also found.

Biome reconstruction suggests a biome mainly of cold deciduous forests between ~14.15 and 10.0 cal ka BP. It must be noted that no full analogues of the Late Glacial vegetation exist in the modern vegetation. Therefore, data interpretation also reflects the tundra and steppe biomes. The tundra biome scores had gradually decreased by 12.7 cal ka BP, whereas the steppe biome reached its maximum between 12.7 and 12.0 cal ka BP.

Reconstructed July temperature for the studied period is lower than modern values (17°C). However, its sharp increase is observed from 10 to 16°C between ~14.15 and 12.7 cal ka BP, followed by the fluctuation of its values within $\pm 1^\circ\text{C}$. Reconstructed annual precipitation was 200–300 mm below modern levels between ~14.15 and 10.7 cal ka BP. It reached modern values of 600 mm/year after 10.7 cal ka BP.

4. Discussion

Allerød (14.15–12.7 cal ka BP). High content of green algae colonies with the maximum concentration of *Pediastrum* ($119\text{--}465 \times 10^3$ colonies/g) and *Botryococcus* (up to 20×10^3 colonies/g) shows favourable conditions for phytoplankton in low flow or standing waters with high content of organic material. The total pollen concentration ($100\text{--}500 \times 10^3$ grains/g) indicates good biological productivity of the landscapes during that period. Periglacial open birch woodland with larch, dwarf birch and willow was widespread. Sedge and grasses with forbs formed semi-aquatic and meadow communities. Ephedra, sagebrush and goosefoot grew in areas with unformed turf cover and dry places with poor rocky and sandy soils. The reconstructed average July temperature shows an increase from 10 to 16°C. The annual precipitation is about 400 mm/year.

Younger Dryas (12.7–11.5 cal ka BP). The total pollen and algae concentration decreases sharply, which shows a rapid deterioration of the conditions, and thus, a decline of the biological productivity of the landscapes and the lake. Open periglacial landscapes were widespread. The area was dominated by sage-

brush and goosefoot with *Ephedra*, Plumbaginaceae and Caryophyllaceae species, communities of sedges, grasses and forbs, shrub thickets of willow and dwarf birch. Larch resistant to environmental extremes formed open larch woodland. The predominance of sagebrush pollen (30–45%), the presence of xerophyte pollen, percentage reduction of tree birch to the minimum values (less than 10%) and the large steppe biome indicate climate aridization between 12.7 and 12.0 cal ka BP. The reconstructed precipitation parameters are 300–350 mm/year. No significant changes in July temperature are recorded.

Early Holocene (11.5–10.0 cal ka BP). The pollen spectra between 11.5 and 10.7 cal ka BP reflect a certain increase in the total pollen content and abundance of spruce, tree and dwarf birch, with a decrease in sagebrush. The tundra and steppe biomes have similar scores, but the biome of cold deciduous forests dominates. Such changes might reflect the expansion of forested areas and the reduction of steppe areas under improved climatic conditions with increased humidity. There is a gradual increase in annual precipitation, though it is still not at modern values. A sharp increase in precipitation up to 600 mm/year is recorded between 10.7 and 10.0 cal ka BP. This correlates with the dominance of arboreal pollen (over 70%), mainly of spruce (40–60%) with larch and tree birch. The percentage of steppe and tundra components decreased. Similar changes characterize the spread of larch-spruce woodland with dwarf birch after 10.7 cal ka BP.

5. Conclusion

Pollen data from the Lake Novozhilovo core enabled us to perform the first reconstruction of the changes in vegetation and climatic conditions of the Late Glacial period and early Holocene in the upper Kama basin. It was found that periglacial birch woodland/forest with larch existed in the Allerød period. Periglacial larch forest-steppe replaced it during the Younger Dryas due to climate aridization. More humid conditions in the early Holocene, as compared to the Late Glacial period, resulted in the spread of larch and spruce woodland.

Acknowledgements

Quantitative paleoclimatic reconstruction based on pollen data was done under the Russian Science Foundation, projects number 23-68-10023, <https://rscf.ru/project/23-68-10023/>. Radiocarbon dating was done under the State Contracts of the Institute of Geography (FMWS-2024-0003).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Cao X., Tian F., Andreev A. et al. 2020. A taxonomically harmonized and temporally standardized fossil pollen dataset

from Siberia covering the last 40 ka. *Earth System Science Data* 12: 119–135. DOI: [10.5194/essd-2019-7](https://doi.org/10.5194/essd-2019-7)

Demakov D.A., Lychagina E.L., Zaretskaya N.E. et al. 2023. Kosinsky Mesolithic sites in the context of the history of the natural environment of the upper Kama region in the Late Glacial and early Holocene. *Geomorfologiya i Paleogeografiya* 54: 74–89. DOI: [10.31857/S0435428123010042](https://doi.org/10.31857/S0435428123010042) (in Russian)

Fægri K., Iversen J. 1975. *Textbook of pollen analysis*, 3rd edn. Oxford: Blackwell.

Juggins S. 2007. C2 Version 1.5 user guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization. Newcastle University, Newcastle upon Tyne.

Kopytov S.V., Sannikov P.Yu., Mekhonoshina E.A. et al. 2024. Organic matter in the lacustrine sediments of the Kama-Keltma lowland (Cis-Urals): assessment of distribution and dynamics in the Late Pleistocene and Holocene. See in this issue.

Lapteva E.G., Zaretskaya N.E., Lychagina E.L. et al. 2023. Holocene vegetation dynamics, river valley evolution and human settlement of the upper Kama valley, Ural region, Russia. *Vegetation History and Archaeobotany* 32: 361–385. DOI: [10.1007/s00334-023-00913-5](https://doi.org/10.1007/s00334-023-00913-5)

Nazarov N.N., Kopytov S.V., Zhuikova I.A. et al. 2020. Pleistocene runoff channels in the southern part of the Keltma hollow (Kama-Vycheгда watershed) *Geomorfologiya* 4(1): 74–88. DOI: [10.31857/S0435428120040070](https://doi.org/10.31857/S0435428120040070) (in Russian)

Prentice C., Guiot J., Huntley B. et al. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics* 12: 185–194. DOI: [10.1007/BF00211617](https://doi.org/10.1007/BF00211617)

Реконструкция природной среды позднеледникового и раннего голоцена по результатам палинологического изучения донных отложений озера Новожилово (Пермское Предуралье, Россия)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЛаптева Е.Г.^{1,2*}, Рудая Н.А.³, Зарецкая Н.Е.^{4,5}, Копытов С.В.^{1,6}, Санников П.Ю.⁶¹ Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет, ул. Пушкина, 42, Пермь, 614000, Россия² Институт экологии растений и животных УрО РАН, ул. 8 Марта, 202, Екатеринбург, 620144, Россия³ Институт археологии и этнографии СО РАН, пр. Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090, Россия⁴ Институт географии РАН, Старомонетный переулок, 29, Москва, 119017, Россия⁵ Геологический институт РАН, Пыжевский переулок, 7, Москва, 119017, Россия⁶ Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990, Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые для бассейна Верхней Камы (Пермское Предуралье) проведены палеолимнологические исследования, в результате которых получена детальная палинологическая летопись, характеризующая изменения природных условий перехода от перигляциальных обстановок позднеледникового к межледниковым условиям голоцена в интервале от 14.15 до 10.0 тыс. кал. л.н. Выявлено, что березовые редколесья при участии лиственницы существовали в аллереде (14.15–12.7 тыс. кал. л.н.), которые в позднем дриасе (12.7–11.5 тыс. кал. л.н.) сменились лиственничной лесостепью. Распространение ели началось в раннем голоцене в интервале 11.5–10.7 тыс. кал. л.н., а лиственнично-еловые редколесья стали доминировать в интервале 10.7–10.0 тыс. кал. л.н. Согласно количественной реконструкции палеоклиматических показателей, средняя температура самого теплого месяца (июль) и среднегодовое количество осадков были значительно ниже современных параметров. Возрастание среднеиюльской температуры от 10 до 16°C наблюдается в интервале 14.15–12.7 тыс. кал. л.н., а затем небольшие колебания в пределах 1°C происходили в интервале 12.7–10.0 тыс. кал. л.н. Среднегодовое количество осадков было на 200–300 мм ниже современного уровня в интервале 14.15–10.7 тыс. кал. л.н. и достигло его только после 10.7 тыс. кал. л.н.

Ключевые слова: палеоэкология, палинология, северо-восток Восточно-Европейской равнины, аллерёд, поздний дриас, ранний голоцен

Для цитирования: Лаптева Е.Г., Рудая Н.А., Зарецкая Н.Е., Копытов С.В., Санников П.Ю. Реконструкция природной среды позднеледникового и раннего голоцена по результатам палинологического изучения донных отложений озера Новожилово (Пермское Предуралье, Россия) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 481-486. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-481](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-481)

1. Введение

Исследования донных отложений озёр впервые проведены в бассейне Верхней Камы, для которого ранее были получены лишь единичные палеоэкологические данные (Назаров и др., 2020; Демаков и др., 2023; Lapteva et al., 2023). Цель исследования – реконструировать динамику растительности и климата бассейна Верхней Камы в позднеледниковье и раннем голоцене на основе детальной пыльцевой записи из донных отложений оз. Новожилово.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lapteva@ipae.uran.ru (Е.Г. Лаптева)

Поступила: 10 июня 2024; **Принята:** 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

2. Материалы и методы

Керн NZH-1 донных отложений оз. Новожилово (60°19'18.5"N, 55°25'15.6"E) мощностью 5.2 м был отобран с помощью бура Ливингстона зимой 2023 года (детали см. Копытов и др., 2024 в этом издании). Для палинологического изучения в лабораторных условиях были отобраны 102 образца мощностью по 2–5 см. Лабораторная обработка образцов выполнена по стандартной методике (Faegri and Iversen, 1975). Тип растительности определен на

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



основе метода биомизации (Prentice et al., 1996), палеоклиматические параметры для средней температуры самого теплого месяца (июль) и среднегодового количества осадков рассчитаны на основе трансферных функций с применением метода средневзвешенных дробных наименьших квадратов (WA-PLS) (Juggins, 2007, Cao et al., 2020).

3. Результаты

Согласно данным литологического и радиоуглеродного анализов, отложения сапропеля в диапазоне глубин 5.2–3.5 м накапливались в позднеледниковье и раннем голоцене в интервале от ~14.15 до 10.0 тыс. кал. л.н. (детали см. Копытов и др., 2024 в этом издании). По изменению таксономического состава и содержания пыльцы пыльцевые спектры, характеризующие обозначенный возрастной интервал, можно разделить на две группы. В первой группе (5.2–4.0 м, 14.15–10.7 тыс. кал. л.н.) преобладает пыльца травянистых растений (около 60%) и кустарников (18–75%). Основной фон создают кустарниковые березы (*Betula* sect. *Apterocaryon* = *B.* sect. *Nanae* – 15–70%) и полынь (*Artemisia* – 25–45%) при участии березы древовидной (*Betula* sect. *Betula* = *B.* sect. *Albae* – 10–30%) и единичных пыльцы и устьиц лиственницы (*Larix*). Пыльца других хвойных пород (*Picea*, *Pinus*) является дальнезасносной, на что указывает ее содержание менее 5%. Во второй группе (4.0–3.5 м, после 10.7 тыс. кал. л.н.) доминирует пыльца древесных пород (70–82%). В пыльцевых спектрах на фоне уменьшения содержания кустарниковых берез (менее 15%) и полыни (5–10%) наблюдается максимум ели (*Picea* – до 55%) и присутствие лиственницы, также обнаружены устьица этих хвойных пород.

По результатам биомизации биом холодных листопадных лесов доминирует в интервале от ~14.15 до 10.0 тыс. кал. л.н. Следует отметить, что полных аналогов растительности позднеледниковья не существует в современности, поэтому при интерпретации данных учитывали вклад тундрового и степного биомов. Удельный вес биома тундры постепенно уменьшается к 12.7 тыс. кал. л.н., в то время как вес степного биома становится наибольшим в интервале 12.7–12.0 тыс. кал. л.н.

Для рассматриваемого возрастного интервала реконструированная температура июля ниже современных значений (17°C), но наблюдается ее резкое возрастание от 10 до 16°C в диапазоне от ~14.15 до 12.7 тыс. кал. л.н., а затем ее значения колеблются в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$. Реконструируемое среднегодовое количество осадков ниже современного уровня в среднем на 200–300 мм в интервале от ~14.15 до 10.7 тыс. кал. л.н. и достигает современных значений около 600 мм/год после 10.7 тыс. кал. л.н.

4. Обсуждение

Аллерёд (14.15–12.7 тыс. кал. л.н.). Высокое содержание колоний зеленых водорослей с максимальной концентрацией видов *Pediastrum* (119–465

тыс. колоний/г) и *Botryococcus* (до 20 тыс. колоний/г) указывает на благоприятные условия для развития фитопланктона в условиях слабопроточной или стоячей воды с высоким содержанием органического вещества. Общая высокая концентрация пыльцы (100–500 тыс. зерен/г) свидетельствует о хорошей биологической продуктивности существовавших ландшафтов. Были распространены перигляциальные березовые редколесья с участием лиственницы, кустарниковых берез и ивы. Осоки и злаки при участии разнотравья формировали прибрежно-водные и луговые сообщества. Эфедра и марево-полынные группировки занимали незадернованные участки и сухие местообитания с бедными каменистыми и песчаными почвами. Наблюдается возрастание реконструированной средней температуры июля от 10 до 16°C. Количество осадков составляло около 400 мм/год.

Поздний друас (12.7–11.5 тыс. кал. л.н.). Общая концентрация пыльцы и водорослей резко сокращается, что указывает на резкое ухудшение условий, и как следствие, снижение биологической продуктивности ландшафтов и самого водоема. Были распространены открытые ландшафты перигляциального типа. Преобладали марево-полынные группировки с эфедрой, видами свинчатковых и гвоздичных, осоковыми и злаково-разнотравными сообществами, кустарниковые заросли из ивы и кустарниковых берез. Лиственница, способная выдерживать экстремальные условия, формировала лиственничные редколесья. Преобладание пыльцы полыни (30–45%), присутствие пыльцы ксерофитов, сокращение доли березы древовидной до минимума (менее 10%) и наибольший вес степного биома свидетельствуют об аридизации климата в интервале 12.7–12.0 тыс. кал. л.н. Реконструированные параметры количества осадков соответствуют 300–350 мм/год. Существенного изменения температуры июля не отмечено.

Ранний голоцен (11.5–10.0 тыс. кал. л.н.). Небольшое увеличение общей концентрации пыльцы, возрастание обилия ели, древовидной и кустарниковой берез на фоне уменьшения полыни наблюдается в пыльцевых спектрах интервала 11.5–10.7 тыс. кал. л.н. Биомы тундры и степи имеют близкие удельные веса, но преобладает биом холодных листопадных лесов. Подобные изменения могут отражать расширение облесенных и сокращение остепненных участков при улучшении климатических условий за счет увеличения влажности климата. Наблюдается постепенный рост уровня годового количества осадков, но еще ниже современных значений. Резкое возрастание количества осадков до 600 мм/год фиксируется в интервале 10.7–10.0 тыс. кал. л.н. Это коррелирует с доминированием пыльцы древесных растений (более 70%), среди которой преобладает ель (40–60%) при участии лиственницы и березы древовидной. Содержание степных и тундровых компонентов уменьшилось. Подобные изменения характеризуют распространение лиственнично-еловых редколесий с участием кустарниковых берез после 10.7 тыс. кал. л.н.

5. Заключение

Пыльцевые данные из керна отложений оз. Новожилово позволили впервые реконструировать изменения растительности и климатических условий позднеледниковья и раннего голоцена в бассейне Верхней Камы. Установлено, что в аллереде существовали березовые с участием лиственницы перигляциальные редколесья/леса, которые при аридизации климата сменились перигляциальной лиственничной лесостепью в позднем дриасе. В раннем голоцене началось распространение лиственнично-еловых редколесий в более гумидных условиях, по сравнению с позднеледниковьем.

Благодарности

Количественная реконструкция климатических параметров по палинологическим данным выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-68-10023, <https://rscf.ru/project/23-68-10023/>). Радиоуглеродный анализ донных отложений проведен в рамках ГЗ ИГ РАН (FMWS-2024-0003).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Демаков Д.А., Лычагина Е.Л., Зарецкая Н.Е. и др. 2023. Косинские мезолитические стоянки в контексте истории природной среды верхнего Прикамья в позднеледниковье и раннем голоцене. *Геоморфология и палеогеография* 54 (1): 74–89. DOI: [10.31857/S0435428123010042](https://doi.org/10.31857/S0435428123010042)

Копытов С.В., Санников П.Ю., Механошина Е.А. и др. 2024. Органическое вещество в донных отложениях озер Камско-Кельтминской низменности (Предуралье): оценка распределения и динамика в позднем плейстоцене и голоцене. См. данное издание

Назаров Н.Н., Копытов С.В., Жуйкова И.А. и др. 2020. Плейстоценовые каналы стока в южной части Кельтминской ложбины (Камско-Вычегодское междуречье). *Геоморфология* 4: 74–88. DOI: [10.31857/S0435428120040070](https://doi.org/10.31857/S0435428120040070)

Cao X., Tian F., Andreev A. et al. 2020. A taxonomically harmonized and temporally standardized fossil pollen dataset from Siberia covering the last 40 ka. *Earth System Science Data* 12: 119–135. DOI: [10.5194/essd-2019-7](https://doi.org/10.5194/essd-2019-7)

Faegri K., Iversen J. 1975. *Textbook of pollen analysis*, 3rd edn. Oxford: Blackwell.

Juggins S. 2007. C2 Version 1.5 user guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization. Newcastle University, Newcastle upon Tyne

Лаптева Е.Г., Зарецкая Н.Е., Лычагина Е.Л. et al. 2023. Holocene vegetation dynamics, river valley evolution and human settlement of the upper Kama valley, Ural region, Russia. *Vegetation History and Archaeobotany* 32: 361–385. DOI: [10.1007/s00334-023-00913-5](https://doi.org/10.1007/s00334-023-00913-5)

Prentice C., Guiot J., Huntley B. et al. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: a general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics* 12: 185–194. DOI: [10.1007/BF00211617](https://doi.org/10.1007/BF00211617)

Bottom sediments of Lake Peyungda as a natural archive of climatic and catastrophic events in the past

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Novikov V.S.^{1*}, Darin A.V.¹, Rogozin D.Yu.², Meidus A.V.³,
Babich V.V.¹, Markovich T.I.¹

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademika Koptyuga Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

²Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50/50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

³Krasnoyarsk State Pedagogical University named after. Astafieva, st. Ady Lebedeva, 89, Krasnoyarsk, 660049, Russia

ABSTRACT. Using scanning micro-XRF using synchrotron radiation, profiles of changes in the section depth of the elemental composition of the banded clays of Lake Peyungda (Krasnoyarsk region), located 33 km southwest of the epicenter of the Tunguska disaster of 1908, were obtained. The age model is confirmed by the presence of a dated layer of anomalous thickness associated with the fall and explosion of the Tunguska cosmic body (TCB). Changes in element contents in dated core layers are compared with instrumental meteorological observation data over the last century, and a relationship is found between the average annual temperature of the region and the elemental composition of coeval layers of bottom sediments (transfer function). According to scanning electron microscope and Raman spectroscopy, the 1908 layer is characterized by increased concentrations of Ti-containing minerals (anatase). The appearance of anatase is probably associated with the explosion of the TCB and the subsequent intense erosion of dolerite bodies, which are widely represented in the catchment area.

Keywords: paleoclimate reconstructions, geochemistry, bottom sediments, Tunguska meteorite, Lake Peyungda, Raman spectroscopy

For citation: Novikov V.S., Darin A.V., Rogozin D.Yu., Meidus A.V., Babich V.V., Markovich T.I. Bottom sediments of Lake Peyungda as a natural archive of climatic and catastrophic events in the past // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 487-492. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-487

1. Introduction

The object of study is the bottom sediments of Peyungda Lake. The lake is located within the Tunguska State Nature Reserve in the Evenki District, at a distance of 30 km from the supposed epicenter of the explosion of the Tunguska cosmic body (1908). Peyungda is a round-shaped freshwater lake with a diameter ca. 600 m and a maximum depth of 35 m (Rogozin et al., 2023). The area of the lake is 0.4 km².

Based on the river basin modeling algorithm using ArcGIS 9.3, the Peyungda Lake catchment area of 80 km² was calculated (ArcGISTM Spatial Analyst, 2001). The collection of meteoric waters transporting matter of terrigenous origin from a catchment area 200 times larger than the lake area allows us to speak about the direct dependence of the chemical composition of the bottom sediment on the composition of the surrounding rocks.

*Corresponding author.

E-mail address: novikovvs@igm.nsc.ru (V.S. Novikov)

Received: May 28, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

Rocks of the Lower Triassic (Tutochanskaya, Uchamskaya formations), represented by complexes of dolerites and tuff-siltstones, are widespread within the study area. Intrusive igneous rocks belong to three complexes (Katangsky, Kuzmovsky, Tychansky) of gabbro- and moderately alkaline dolerites of the Early Triassic and the agate complex of dolerites of the Middle Triassic. Intrusions form small thin bodies of isometric, isometric-elongated shape, sheet bodies, dikes (Varganov et al., 2015).

2. Materials and methods

In 2022, two cores of bottom sediments were obtained: cores Pe-22-1 and Pe-22-3 with a length of 1076 mm and 1187 mm, respectively. Sampling was carried out using a UWITEC gravity sampler (Austria) in the central deep-water part of the lake. The cores

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



were divided into two parts along the sampling axis. From one half of the core, samples were prepared by cutting with a step of 10 mm, from the second, solid samples were prepared for continuous X-ray diffraction scanning at the synchrotron center of the Institute of Nuclear Physics SB RAS according to the method (Darin et al., 2013).

After the samples were delivered to the Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk), solid preparations were prepared by freeze drying and impregnation with epoxy resin. To analyze the content of chemical elements, plane-parallel samples of 2 mm thickness with a ground surface, made from solid preparations of bottom sediments, were used. Optical sections were also made from solid preparations.

Dating of deposits was carried out based on measurements of ^{210}Pb and ^{137}Cs activities along the depth of the section and counting visually identified layers. An age model “core depth-sediment age” was constructed. At a depth of about 80 mm, in all cores there is a visually distinguishable light layer with a thickness of 2-3 mm, which on the age scale corresponds to 1908.

Scanning micro-XRF using synchrotron radiation beams was carried out at the Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation using the method Darin et al. (2013). The size of the exciting radiation spot and the scanning step were 1 mm, which is approximately equal to 1.2 - 1.5 years on the age scale. At each point, the rock-forming and trace elements K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, as well as the Co/Inc ratio were simultaneously determined elastically/inelastically scattered exciting radiation on the sample.

3. Results

Using an age model, data on the elemental composition of bottom sediment were recalculated from

a linear scale (core depth from the water-sediment boundary) into an integer time series and averaged in steps of 3 years. Data from the nearest weather station at Vanavara, available from 1895 to 2000, were used to search for relationships between geochemical parameters and meteorological parameters (<https://climexp.knmi.nl>; <http://meteo.ru/data/156-temperature>). Using the multiple regression method (Babich et al., 2015), a transfer function was constructed linking the regional average annual temperature with lithological and geochemical data:

$$T = 5.389 \cdot \text{Co/Inc} + 3.887 \cdot \text{Br} + 1.443 \cdot \text{Rb} - 5.657,$$

where Br, Rb - concentrations of bromine and rubidium in g/t (ppm), Co/Inc - ratio of the excitation radiation elastically/inelastically scattered on the sample.

Polished sections were scanned using a MIRA 3 LMU scanning electron microscope (SEM). In the 1908-10 layer, an increased content of Ti-containing minerals relative to the overlying and underlying layers was established. The use of Raman spectroscopy methods to identify Ti-containing minerals using the automated WITec Apyron system showed that Ti-containing minerals are represented by anatase (titanium dioxide), characteristic of weathering products of gabbrodolerites.

Detailed 2D micro-XRF scan of the 1908-10 layer, with a step of 0.1-0.2 mm, showed the presence of geochemical anomalies in the form of increased contents of elements characteristic of terrigenous material - Ti, Rb, Zr, Y, Nb. The complex structure of the layer has been determined, showing its formation over 2-3 years (Fig. 1).

4. Conclusions

The use of a modern analytical method of micro-XRF using synchrotron radiation beams makes it possible to construct transfer functions that reflect the dependence of changes in the elemental sediment of

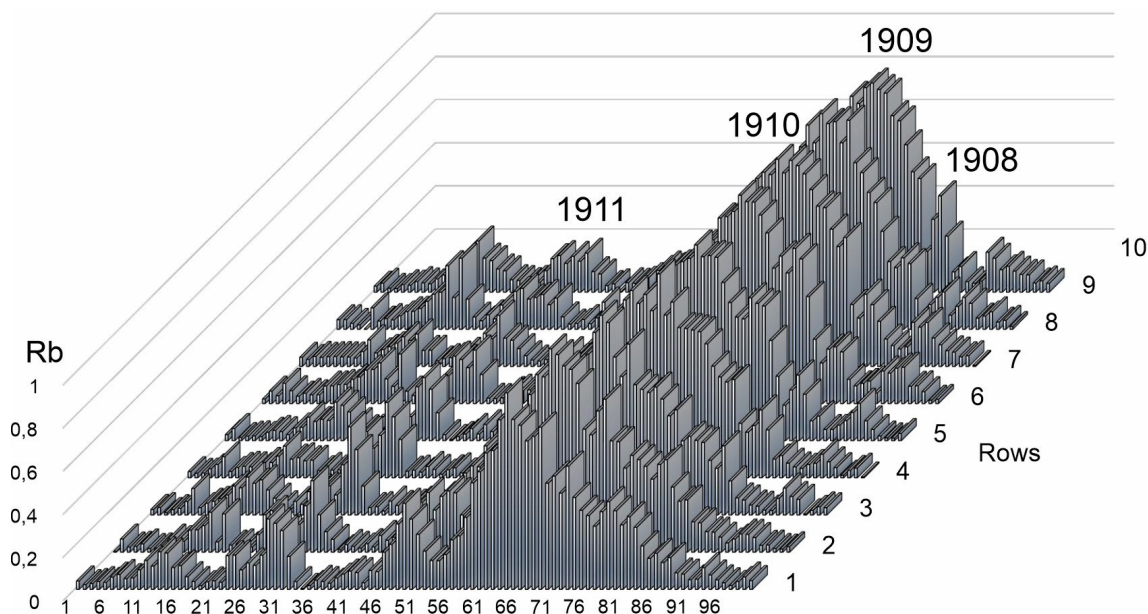


Fig.1. Distribution of rubidium according to 2D micro-XRF scanning of the 1908-10 layer, with a step of 0.1 mm in a thin section of bottom sediments of Lake Peyungda. A complex structure of the layer formed as a result of increased removal of terrigenous material from the catchment area after the explosion of the TKT in 1908 was revealed.

Lake Peyungda on the average annual temperatures of the study area.

For the obtained function, the correlation coefficient between the initial meteorological data used for training (1895-2000) and the calculated values was + 0.58 ($n = 105$, $p = 0.01$), which makes it possible to reconstruct the average annual temperature of the region based on geochemical data for the entire core sampling depth with 3-year time resolution and quantitative assessment of the reconstructed value.

Detailed studies of the anomalous layer dating from 1908-10 showed that, in comparison with the overlying and underlying layers, the amount of anatase mineral grains in it increases and a number of geochemical anomalies are observed - increased contents of elements characterizing terrigenous demolition material. The source of terrigenous material is the weathering products of differentiated intrusions of the gabbrodolerite complex, which are widely represented within the drainage area.

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant 22-17-00185 and within the framework of the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS No. 122041400214-9.

References

- ArcGISTM Spatial Analyst: Advanced GIS Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. 2001. ESRI White Paper. Redlands 17.
- Babich V.V., Rudaya N.A., Kalugin I.A. et al. 2015. Complex Use of the Geochemical Features of Bottom Deposits and Pollen Records for Paleoclimate Reconstructions (on the Example of Lake Teletskoye, the Altai Republic). *Contemporary Problems of Ecology* 4: 497–506. (in Russian)
- Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V. 2013. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 77: 182–184. DOI: [10.3103/S106287381302010X](https://doi.org/10.3103/S106287381302010X)
- Varganov A.S., Popova N.N., Sosnovskaya O.V. 2015. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta RF. Mashtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Angaro-Eniseyskaya. List P-47 – Baykit. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation of the third generation. Scale 1 : 1 000 000. Angaro-Eniseyskaya series. Sheet P-47 – Baykit. Explanatory note]. St. Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI. (in Russian)
- Rogozin D.Y., Krylov P.S., Dautov A.N. et al. 2023. Morphology of Lakes of the Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk Krai, Evenkiya): New Data on the Problem of the Tunguska Event of 1908. *Doklady Earth Sciences* 510: 307–311. DOI: [10.1134/S1028334X23600044](https://doi.org/10.1134/S1028334X23600044)

Донные осадки озера Пеюнга, как природный архив климатических и катастрофических событий прошлого

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНовиков В.С.^{1*}, Дарьин А.В.¹, Рогозин Д.Ю.², Мейдус А.В.³,
Бабич В.В.¹, Маркович Т.И.¹¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Академгородок, 50, Красноярск, 660036, Россия³Красноярский Государственный Педагогический Университет им. Астафьева, ул. Ады Лебедевой, 89, Красноярск, 660049, Россия

АННОТАЦИЯ. С помощью сканирующего микро-РФА с использованием синхротронного излучения получены профили изменения по глубине разреза элементного состава ленточных глин озера Пеюнга (Красноярский край, Эвенкия), расположенного в 33 км к юго-западу от эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 года. Возрастная модель подтверждается наличием датированного слоя аномальной мощности, связанного с падением и взрывом Тунгусского космического тела (ТКТ). Изменения содержаний элементов по датированным слоям керна сопоставлены с данными инструментальных метеонаблюдений за последнее столетие и найдена связь среднегодовой температуры региона и элементного состава одновозрастных слоев донных осадков (трансферная функция). По данным сканирующего электронного микроскопа и рамановской спектроскопии, слой 1908 г. отличается повышенными концентрациями Ti-содержащих минералов (анатаза). Появление анатаза, вероятно, связано со взрывом ТКТ и последующим интенсивным размывом долеритовых тел, широко представленных на территории водосбора.

Ключевые слова: палеоклиматические реконструкции, геохимия, донные отложения, Тунгусский метеорит, озеро Пеюнга, КР-спектроскопия

Для цитирования: Новиков В.С., Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В., Бабич В.В., Маркович Т.И. Донные осадки озера Пеюнга, как природный архив климатических и катастрофических событий прошлого // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 487-492. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-487

1. Введение

Объектом исследования являются донные осадки озера Пеюнга. Озеро располагается в пределах ГПЗ “Тунгусский” в Эвенкийском автономном округе, на расстоянии 30 км от предполагаемого эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (1908 г.). Пеюнга представляет собой пресноводное озеро округлой формы диаметром около 600 м и максимальной глубиной 35 м (Rogozin et al., 2023). Площадь озера составляет 0,4 км².

На основании алгоритма моделирования речных бассейнов средствами ArcGIS 9.3 был произведен расчет площади территории водосбора озера Пеюнга 80 км² (ArcGISTM Spatial Analyst, 2001). Сбор метеорных вод, транспортирующих вещество тригенного происхождения, с площади водос-

бора в 200 раз превышающей площадь озера позволяет говорить о прямой зависимости химического состава донного осадка от состава окружающих горных пород.

Широкое распространение в пределах исследуемой территории получили породы нижнего триаса (туточанская, учамская свиты), представленные комплексами долеритов и туфоалевритов. Интрузивные магматические породы относятся к трем комплексам (катангский, кузьмовский, тычанский) габбро- и умеренно щелочных долеритов раннего триаса и агатскому комплексу долеритов среднего триаса. Интрузии образуют мелкие мало-мощные тела изометричной, изометрично-вытянутой формы, пластовые тела, дайки (Варганов и др., 2015).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: novikovvs@igm.nsc.ru (В.С. Новиков)

Поступила: 28 мая 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материал и методы исследования

В 2022 г. отобрано два керна донных отложений: керны Pe-22-1 и Pe-22-3 длиной 1076 мм и 1187 мм, соответственно. Отбор осуществлялся с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) в центральной глубоководной части озера. Керны разделялись вдоль оси пробоотбора на две половины. Из одной половины керна готовились дискретные образцы нарезкой с шагом 10 мм, из второй изготавливались твердые образцы для непрерывного РФА-сканирования в синхротронном центре ИЯФ СО РАН по методике (Darin et al., 2013).

После доставки проб в ИГМ СО РАН (Новосибирск), изготавливались твердые препараты путем лиофильной сушки и пропитки эпоксидной смолой. Для анализа содержания химических элементов использовались плоскопараллельные образцы 2-миллиметровой толщины с пришлифованной поверхностью, изготовленные из твердых препаратов донных осадков. Из твердых препаратов также были изготовлены оптические шлифы.

Датировка отложений осуществлялась на основе измерений активностей ^{210}Pb и ^{137}Cs по глубине разреза и подсчета визуально выделяемых слоев. Была построена возрастная модель «глубина керна-возраст осадков». На глубине около 80 мм во всех кернах наблюдается визуально различимый светлый слой мощностью 2-3 мм, который на возрастной шкале соответствует 1908 году.

Сканирующий микро-РФА на пучках синхротронного излучения проводился в ЦКП «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» по методике (Darin et al., 2013). Размер пятна возбуждающего излучения и шаг сканирования составлял 1 мм, что примерно равно 1,2 - 1,5 лет на возрастной шкале. В каждой точке одновременно определялись порообразующие и следовые элементы K, Ca, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, а также Co/Inc – отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения.

3. Результаты

С использованием возрастной модели (глубина керна – возраст осадка) данные об элементном составе донного осадка были пересчитаны из линейной шкалы (глубина керна от границы вода-осадок) в целочисленный временной ряд и усреднены с шагом в 3 года. При поиске взаимосвязи между геохимическими параметрами и метеопараметрами использовались данные ближайшей метеостанции в пос. Ванавара, доступные с 1895 по 2000 г. (<https://climexp.knmi.nl>; <http://meteo.ru/data/156-temperature>). Методом множественной регрессии (Бабич и др., 2015), была построена трансферная функция, связывающая региональную среднегодовую температуру с литолого-геохимическими данными:

$$T = 5.389 \cdot \text{Co/Inc} + 3.887 \cdot \text{Br} + 1.443 \cdot \text{Rb} - 5.657,$$

где Br, Rb – концентрации брома и рубидия в г/т (ppm), Co/Inc – отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения.

Полированные шлифы сканировались с применением электронного сканирующего микроскопа (СЭМ) MIRA 3 LMU. В слое 1908-10 гг. установлено повышенное содержание Ti-содержащих минералов относительно выше- и нижележащих слоев. Применение методов КР-спектроскопии для идентификации Ti-содержащих минералов с использованием автоматизированной системы WITec Arupon показало, что Ti-содержащие минералы представлены анатазом (диоксид титана), характерным для продуктов выветривания габбродолеритов.

Детальное 2D микро-РФА сканирование слоя 1908-10 гг. с шагом 0,1-0,2 мм, показало наличие геохимических аномалий в виде повышенных содержания элементов, характерных для терригенного материала – Ti, Rb, Zr, Y, Nb. Определена сложная структура слоя, показывающая его образование в течении 2-3 лет (Рис.1).

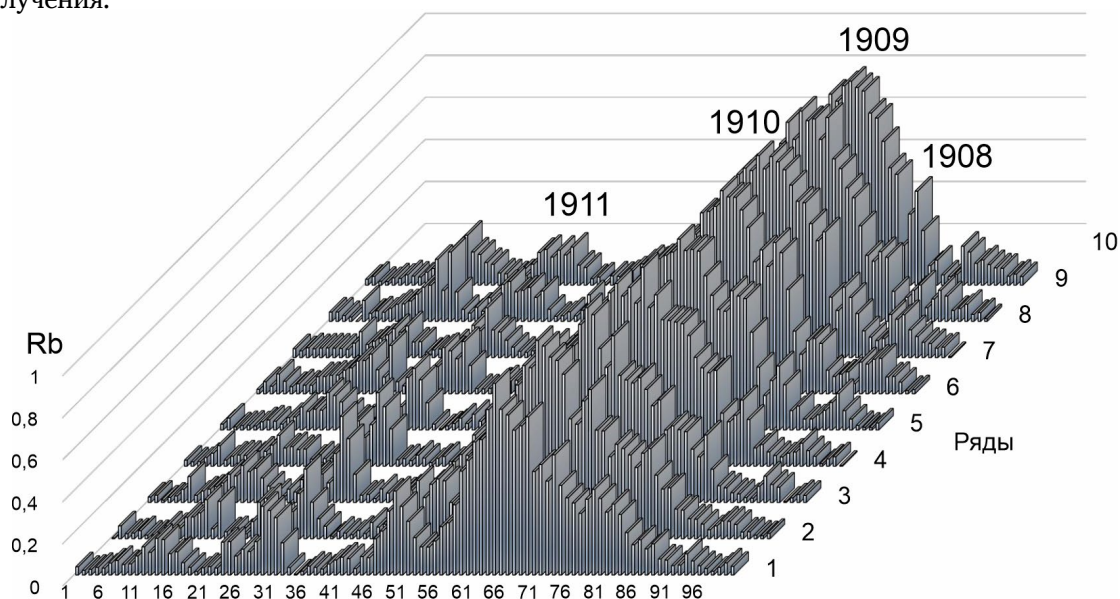


Рис.1. Распределение рубидия по данным 2D микро-РФА сканирование слоя 1908-10 гг. с шагом 0,1 мм в шлифе донных осадков озера Пеюнга. Выявлена сложная структура слоя, образовавшегося в результате повышенного сноса терригенного материала с территории водосбора после взрыва ТКТ в 1908 г.

4. Выводы

Использование современного аналитического метода микро-РФА на пучках синхротронного излучения дает возможность построения трансферных функций, отображающих зависимость изменения элементного осадка озера Пеюнда от среднегодовых температур района исследования.

Для полученной функции коэффициент корреляции между исходными метеоданными, используемыми для обучения (1895-2000 гг.) и расчетными величинами составил + 0.58 ($n = 105$, $p = 0.01$), что позволяет строить реконструкцию среднегодовой температуры региона по геохимическим данным на всю глубину опробования керна с 3-х летним временным разрешением и количественной оценкой реконструируемой величины.

Детальные исследования аномального слоя, датированного 1908-10 гг., показали, что в сравнении с выше- и нижележащими слоями в нем возрастает количество минеральных зерен анатаза и наблюдается ряд геохимических аномалий, – повышенные содержания элементов, характеризующих материал терригенного сноса. Источником терригенного материала являются продукты выветривания дифференцированных интрузий комплекса габбродолеритов, широко представленных в пределах водосборной площади.

Благодарности

Работы выполнены при поддержке гранта РФФ 22-17-00185 и в рамках государственного задания ИГМ СО РАН №122041400214-9.

Список литературы

Бабич В.В., Рудая Н.А., Калугин И.А. и др. 2015. Опыт комплексного использования геохимических особенностей донных отложений и палинологических записей для палеоклиматических реконструкций (на примере оз. Телецкое, Российский Алтай) // Сибирский экологический журнал 22 (4): 497–506.

Варганов А. С., Попова Н. Н., Сосновская О. В. и др. 2015. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист Р-47 – Байкит. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 359 с.

ArcGISTM Spatial Analyst: Advanced GIS Spatial Analysis Using Raster and Vector Data. 2001. ESRI White Paper. Redlands 17.

Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Y.V. 2013. Scanning X-ray microanalysis of bottom sediments using synchrotron radiation from the BINP VEPP-3 storage ring. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics 77: 182–184. DOI: [10.3103/S106287381302010X](https://doi.org/10.3103/S106287381302010X)

Rogozin D.Y., Krylov P.S., Dautov A.N. et al. 2023. Morphology of Lakes of the Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk Krai, Evenkiya): New Data on the Problem of the Tunguska Event of 1908. Doklady Earth Sciences 510: 307–311. DOI: [10.1134/S1028334X23600044](https://doi.org/10.1134/S1028334X23600044)

Reduced sulfur compounds in the bottom sediments of meromictic lakes

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Losyuk G.N.* , Kokryatskaya N.M., Vakhrameeva E.A., Popov S.S.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation

ABSTRACT. This paper presents data on the content of reduced sulfur compounds in the bottom sediments of two meromictic reservoirs: Mogilnoe Lake (Barents Sea) and Lake Trekhtsvetnoe (White Sea). A distinctive feature of both reservoirs is the high content of hydrogen sulfide in the anaerobic monimolimnion. The total content of reduced sulfur compounds, characterized by the ΣS_{H_2S} parameter, averaged 0.500% for Mogilnoe Lake and 0.994% for Lake Trekhtsvetnoe. The main form of sulfur for both lakes was pyrite (more than 60% for Mogilnoe Lake and up to 80% for Lake Trekhtsvetnoe). Significant amounts of sulfur associated with organic matter were noted in the surface layers. The contents of acid-soluble monosulfides and elemental sulfur were not significantly different (no more than 10% of ΣS_{H_2S}). This distribution of forms in the composition of ΣS_{H_2S} makes the bottom sediments of the studied lakes similar to sea sediments. The high level of accumulation of reduced sulfur compounds in sediments is due to their provision of a sufficient amount of organic matter, which comes mainly from the chemocline zone.

Keywords: Meromictic reservoir, bottom sediments, stratification, hydrogen sulfide, reduced sulfur compounds**For citation:** Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Vakhrameeva E.A., Popov S.S. Reduced sulfur compounds in the bottom sediments of meromictic lakes // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 493-498. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-493

1. Introduction

Meromictic reservoirs are characterized by unique hydrological and hydrochemical structures. The water column of such lakes is a multilayer structure consisting of a mixed aerobic mixture followed by a chemo-, halo- and thermocline mixture, and below is an anaerobic layer with a high content of hydrogen sulfide, which is formed due to the intensive process of bacterial reduction of sulfates. This process also occurs in bottom sediments (BSs). The purpose of this study was to compare the content of reduced sulfur compounds, a geochemical parameter of the sulfate reduction process, in the sediments of two meromictic lakes located in the European Far North basin of two different Arctic seas, the White and Barents Seas.

One of these lakes is Mogilnoe Lake, which is located on Kildin Island in the Barents Sea and is a unique hydrological natural monument of federal significance. It is the remnant of a sea bay, separated from the sea approximately one and a half thousand years ago by a stone bridge, but still maintains an underground

connection with the sea. Mogilnoe Lake has the longest history of study among the meromictic lakes of Russia, at almost 140 years. The most famous endemic of this relict lake is Kildin cod. The average depth of the lake is approximately 7 m (the maximum depth is 16 m). This research confirmed the development of negative trends in the lake's ecosystem, namely, an increase in the maximum concentrations of hydrogen sulfide in the bottom horizons to 210 mg/l, as well as an increase in the boundaries of its distribution in the water column.

Lake Trekhtsvetnoye is a reservoir located at the meromictic stage of separation from Kandalaksha Bay in the White Sea. The maximum depth of the lake is 7.5 m; its distinctive feature is the presence of a bright green layer 15-20 cm thick, located above the chemocline, formed by the massive development of anoxygenic phototrophic green-colored sulfur bacteria. The lake shows the accumulation of large concentrations of hydrogen sulfide in the bottom layers — up to 600 mg/l (Losyuk et al., 2021).

In BS, the formation of hydrogen sulfide as a result of the sulfate reduction process is accompanied

*Corresponding author.

E-mail address: glosyuk@yandex.ru (G.N. Losyuk)**Received:** June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;**Available online:** August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



by the formation of various organic and inorganic compounds of reduced sulfur, the total content of which is usually characterized by the parameter “sum of bacterial hydrogen sulfide derivatives (ΣS_{H_2S})”. It contains sulfur from acid-soluble sulfides, pyrite, and elemental and organic forms.

2. Materials and methods

Bottom sediment samples were taken in March and June 2019. The sampling was carried out using an Aquatic Research Instruments (USA) direct-flow soil impact tube with an internal diameter of 50 mm, a length of 60 cm, and a sampling discreteness of 5 cm. Immediately after sampling, the sediment samples were placed in plastic bags, from which the air was squeezed to prevent oxidation. The analysis of the contents of oxidized and reduced forms of sulfur in the samples was carried out using the method of systematic phase analysis developed in the Laboratory of Geochemistry of the Institute of Oceanology RAS (Volkov and Zhabina, 1980).

3. Results and discussion

The sediments collected from the lakes were represented by dark brown flooded silts. The humidity of the samples was 93.6-33.2% in Mogilnoe Lake and 95.6-74.4% in the lake. Tricolor. The content of organic matter was determined on a EuroVector CHN analyser and varied from 11.3 to 1.8% for Mogilnoe Lake and from 8.6 to 5.5% for Lake Trekhtsvetnoe. In Mogilnoe Lake, a significant contribution to the composition of organic matter is made by the terrigenous component, which is confirmed by the C/N parameter, which is equal to 10.7 on average for the column; in Lake Trekhtsvetnoe, the autochthonous component predominated (C/N was on average 6.5 for the column).

In bottom sediments, as a result of the activity of sulfate-reducing bacteria under anoxic conditions, hydrogen sulfide is formed, which is transformed into a number of reduced sulfur compounds of varying stability, namely, acid-soluble sulfur monosulfides (mainly hydrotroilite), pyrite, elemental sulfur and sulfur associated with organic matter. The content of total reduced sulfur (ΣS_{H_2S}), which is the sum of these four main forms of reduced sulfur in bottom sediments, in the sediments of Mogilnoe Lake varied from 0.252 to 1.650%, with an average amount of 0.500%. Its maximum content is confined to the surface horizons of sediments enriched in organic matter. As one descended into their thickness, its amount either decreased (at deeper-sea stations) or remained practically unchanged. In the composition of ΣS_{H_2S} , the predominant form was pyrite, which indirectly indicates the active occurrence of bacterial sulfate reduction in the sediments of Mogilnoe Lake. The content of pyrite sulfur varies from 0.03 to 1.39%, averaging 0.34% (more than 60% of the total content of all forms of reduced sulfur). The highest amounts of organic sulfur were noted in the sediments of the surface horizons, after which the amount decreased. The sulfide content varied in the range from 0.002 to

0.017%; the maximum contents are noted in the upper layers of sediments (0.009–0.017%), and in the lower horizons, its concentrations decrease by 3–4 times. Elemental sulfur, the concentration range of which varied from 0.002 to 0.016% (average value of 0.007%), was found throughout the entire studied layer of lake sediments, starting from their surface. High level of accumulation in lake sediments. The abundance of reduced sulfur compounds is due to their provision of a sufficient amount of organic matter.

The total reduced sulfur content in the sediments of Lake Trekhtsvetnoe averaged 0.994% (0.225-1.467%). The main form of reduced sulfur in the sediments was pyrite (the average content was 0.692%, with a range of 0.045-1.165%). At the same time, its share reached 60-80% in ΣS_{H_2S} . Organic sulfur, the second most stable form of accumulated reduced sulfur, had a noticeable effect only in the surface horizons of the sediments (its amount varied in the range from 0.043 to 0.180%, with an average value of 0.130%). As one moves deeper into the sediment, its amount changes slightly, but its share of the composition of ΣS_{H_2S} passively decreases with an increase in the content of other forms: the contribution in the upper horizons reaches 58% of that of ΣS_{H_2S} , and in the lower horizons, it reaches only 4-9%. The amount of intermediate forms (sulfide and elemental sulfur) in their total content is small (on average for columns 0.026% and 0.146%, respectively). This is especially true for acid-soluble sulfide sulfur, and its contribution to ΣS_{H_2S} for the entire studied Lake Trekhtsvetnoe did not exceed 3.6%. The role of elemental sulfur is more noticeable (up to 10% of ΣS_{H_2S}). The greatest accumulation of reduced sulfur compounds occurred in the sediments of the lake. Lake Trekhtsvetnoe is most likely supplied by OM, which is predominantly of autochthonous origin due to the intensive development of microbiological communities in the chemocline zone and in the lake water column (Losyuk et al., 2023).

4. Conclusion

Thus, the contents of reduced sulfur compounds in the sediments of the two meromictic lakes were analysed. In both lakes, a high level of their accumulation was noted; both similar values of the amount of ΣS_{H_2S} and similar profiles of the ratio of various forms in their sum were obtained. Namely, the predominant form for both lakes was pyrite (more than 60% for Mogilnoe Lake and up to 80% for Lake Trekhtsvetnoe). The highest amounts of organic sulfur were observed in the surface layers. The contents of sulfide forms and elemental sulfur were insignificant. All this makes the distribution profiles of the forms of reduced sulfur compounds similar to the data for marine sediments. The high level of accumulation of reduced sulfur compounds in sediments is due to their provision of a sufficient amount of organic matter accessible to microorganisms.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Volkov I.I., Zhabina N.N. 1980. Methods for the determination of various sulfur compounds in marine sediments. Chemical analysis of marine sediments. Nauka, Moscow pp 5–27 (in Russian).

Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Krasnova E.D. 2021. Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Oceanology* 61(3): 351–361. DOI: [10.1134/S0001437021020120](https://doi.org/10.1134/S0001437021020120)

Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Vakhrameyeva E.A., Aliev R.A. 2023. Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic Lake Trekhtsvetnoe). *Oceanology* 63(5): 683–692. DOI: [10.1134/S0001437023050065](https://doi.org/10.1134/S0001437023050065)

Соединения восстановленной серы в донных осадках меромиктических озер



Лосюк Г.Н.*, Кокрятская Н.М., Вахрамеева Е.А., Попов С.С.

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, пр. Никольский, 20, Архангельск, 163020, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены данные о содержании соединений восстановленной серы в донных осадках двух меромиктических водоемах: оз. Могильное (Баренцево море) и оз. Трехцветное (Белое море). Отличительной чертой обоих водоемов является высокое содержание сероводорода в анаэробном мнимом лимнионе. Общее содержание соединений восстановленной серы, характеризующиеся параметром ΣS_{H_2S} , составляло в среднем 0.500% для оз. Могильного и 0.994% для оз. Трехцветного. Основной формой серы для обоих озер была пиритная (более 60% для оз. Могильное и до 80% для оз. Трехцветное). В поверхностных слоях были отмечены значительные количества серы, связанной с органическим веществом. Содержание серы кислоторастворимых моносulfидов и элементной серы было незначительно (не больше 10% от ΣS_{H_2S}). Данное распределение форм в составе ΣS_{H_2S} делает донные осадки исследуемых озер схожими с морскими. Высокий уровень накопления в осадках соединений восстановленной серы обусловлен обеспеченностью их достаточным количеством органического вещества, поступающего преимущественно из зоны хемоклина.

Ключевые слова: Меромиктический водоем, донные осадки, стратификация, сероводород, соединения восстановленной серы

Для цитирования: Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Вахрамеева Е.А., Попов С.С. Соединения восстановленной серы в донных осадках меромиктических озер // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 493-498. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-493

1. Введение

Меромиктические водоемы представляют собой объекты с уникальной гидрологической и гидрохимической структурой. Водная тоща таких озер представляет собой многослойную структуру, состоящую из перемешивающегося аэробного миксолимниона, далее идет хемо-, гало- и термо-клин и ниже располагается анаэробный слой с высоким содержанием сероводорода, который образуется за счет интенсивно протекающего процесса бактериального восстановления сульфатов. Протекает этот процесс и в донных осадках (ДО). Целью данного исследования являлось сравнить содержание соединений восстановленной серы, как геохимического параметра процесса сульфатредукции, в осадках двух меромиктических озер, расположенных на территории Европейского Крайнего Севера, но относящихся к бассейнам двух разных арктических морей: Белого и Баренцево.

Одно из таких озер это оз. Могильное, расположенное на о. Кильдин в Баренцевом море, – уникальный гидрологический памятник природы федерального значения. Оно является остатком морского залива, отделившегося от моря около полутора тысяч лет назад каменной перемычкой, но до сих пор сохраняющего подземную связь с морем. Оз. Могильное имеет самую длительную историю изучения среди меромиктических озер России почти 140 лет. Самый известный эндемик этого реликтового озера – кильдинская треска. Средняя глубина озера – около 7 м (максимальная глубина 16 м). В ходе исследований было подтверждено развитие негативных тенденций в экосистеме озера, а именно увеличение максимальных концентраций сероводорода в придонных горизонтах до 210 мг/л, а также подъема границ его распространения в водной толще.

Озеро Трехцветное – водоем, находящийся на меромиктической стадии отделения от

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: glosyuk@yandex.ru (Г.Н. Лосюк)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Кандалакшского залива Белого моря. Максимальная глубина озера 7.5 м, его отличительной чертой является наличие слоя ярко-зеленого цвета толщиной 15-20 см, расположенного над хемоклином, образованного массовым развитием аноксигенных фототрофных зеленоокрашенных серобактерий. В озере отмечается накопление огромных концентраций сероводорода в придонных слоях - до 600 мг/л (Лосюк и др., 2021).

В ДО появление сероводорода в результате процесса сульфатредукции сопровождается образованием разнообразных органических и неорганических соединений восстановленной серы, общее содержание которых обычно характеризуют параметром “сумма производных бактериального сероводорода (ΣS_{H_2S})”. В ее состав входит сера кислоторастворимых сульфидов, пиритная, элементная и органическая формы.

2. Материалы и методы

Пробы донных осадков были отобраны в марте и июне 2019 г. Отбор производили ударной прямоточной грунтовой трубкой Aquatic Research Instruments (США) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см, дискретность отбора проб 5 см. Пробы ДО сразу после отбора помещались в полиэтиленовые пакеты, из которых отжимался воздух для предотвращения окисления. Анализ проб на содержание окисленных и восстановленных форм серы проводили по методике систематического фазового анализа, разработанной в лаборатории геохимии Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Волков и Жабина, 1980).

3. Результаты и обсуждение

Отобранные в озерах осадки были представлены обводненными илами темно-коричневого цвета. Влажность проб была 93.6-33.2% в оз. Могильном и 95.6-74.4% в оз. Трехцветном. Содержание органического вещества определено на CHN-анализаторе EuroVector и варьировало от 11.3 до 1.8 % для оз. Могильное и 8.6 и 5.5% для оз. Трехцветное. В оз. Могильном в состав органического вещества значительный вклад вносит терригенная составляющая, что подтверждается параметром C/N, равным в среднем по колонке 10.7; в оз. Трехцветное преобладала автохтонная составляющая (C/N был в среднем по колонке 6.5).

В донных осадках в результате деятельности сульфатредуцирующих бактерий в бескислородных условиях идет образование сероводорода, который трансформируется в ряд различных по устойчивости соединений восстановленной серы, а именно кислоторастворимых моносulfидов серы (преимущественно гидротроилита), пирита, элементной серы и серы, связанной с органическим веществом. Содержание общей восстановленной серы (ΣS_{H_2S}), представляющей собой сумму этих четырех основных форм восстановленной серы в донных

отложениях, в осадках оз. Могильного изменялось от 0.252 до 1.650 %, при среднем количестве 0.500 %. Ее максимальное содержание приурочено к обогащенным органическим веществом поверхностным горизонтам осадков. По мере погружения в их толщу количество ее или уменьшалось (на более глубоководных станциях) или оставалось практически неизменным. В составе ΣS_{H_2S} преобладающей формой был пирит, что косвенно свидетельствует об активном протекании в отложениях о. Могильное процесса бактериальной сульфатредукции. Содержание пиритной серы изменяется от 0.03 до 1.39%, составляя в среднем 0.34% (более 60% от их суммарного содержания всех форм восстановленной серы). Наиболее высокие количества органической серы отмечены в осадках поверхностных горизонтов, затем ее количество уменьшалось. Содержание сульфидной серы изменялось в интервале значений от 0.002 до 0.017%; максимальные содержания отмечены в верхних слоях отложений (0.009–0.017%), на нижних горизонтах ее концентрации уменьшаются в 3–4 раза. Элементная сера, интервал концентраций которой изменялся от 0.002 до 0.016% (среднее значение 0.007%), обнаруживается во всей исследованной толще озерных осадков, начиная с их поверхности. Высокий уровень накопления в осадках оз. Могильное соединений восстановленной серы обусловлен обеспеченностью их достаточным количеством органического вещества.

Содержание общей восстановленной серы в осадках оз. Трехцветное составляло в среднем 0.994% (0.225-1.467%). Основной формой восстановленной серы в осадках была пиритная форма (среднее содержание составляло 0.692% при диапазоне 0.045-1.165%). При этом ее доля доходила до 60-80% в ΣS_{H_2S} . Органическая сера, вторая устойчивая форма накопления восстановленной серы, оказывала заметное влияние только в поверхностных горизонтах осадков (ее количество изменялось в интервале от 0.043 до 0.180% при среднем значении 0.130%). По мере погружения в толщу отложений ее количество изменяется незначительно, однако ее доля в составе ΣS_{H_2S} пассивно падала при увеличении содержания других форм: вклад в верхних горизонтах составлял до 58% от ΣS_{H_2S} , а в нижних уже только 4-9%. Количество промежуточных форм (сульфидной и элементной серы) в их суммарном содержании невелика (в среднем по колонке 0.026% и 0.146% соответственно). Особенно это справедливо для кислоторастворимой сульфидной серы, ее вклад в ΣS_{H_2S} для всего исследованного керна оз. Трехцветного не превышал 3.6%. Более заметна роль элементной серы (до 10% от ΣS_{H_2S}). Наиболее высокий уровень накопления соединений восстановленной серы в ДО оз. Трехцветного обеспечивается, скорее всего, поступлением ОВ, имеющим преимущественно автохтонное происхождение за счет интенсивно развивающихся микробиологических сообществ в зоне хемоклина и в толще озерной воды (Лосюк и др., 2023).

4. Заключение

Таким образом, были проанализированы осадки двух меромиктических озер на содержание соединений восстановленной серы. В обоих озерах отмечен высокий уровень их накопления, получены как близкие значения количества ΣS_{H_2S} , так и схожие профили соотношения различных форм в составе их суммы. А именно преобладающей формой для обоих озер была пиритная (более 60% для оз. Могильное и до 80% для оз. Трехцветное). В поверхностных слоях были отмечены наиболее высокие количества органической формы серы. Содержание сульфидных форм и элементной серы было незначительно. Все это делает профили распределения форм соединений восстановленной серы схожими с данными для морских осадков. Высокий уровень накопления в осадках соединений восстановленной серы обусловлен обеспеченностью их достаточным количеством доступного для микроорганизмов органического вещества.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

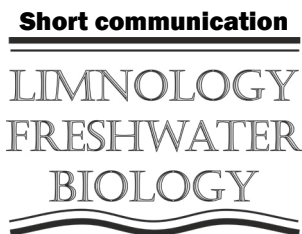
Список литературы

Волков И. И., Жабина Н. Н. 1980. Методы определения различных соединений серы в морских осадках. Химический анализ морских осадков. М.: Наука. С. 5-27.

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Краснова Е.Д. 2021. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря. *Океанология* 61(3): 401412. DOI [10.31857/S003015742102012X](https://doi.org/10.31857/S003015742102012X)

Лосюк Г.Н., Кокрятская Н.М., Вахрамеева Е.А. и др. 2023. Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное). *Океанология* 63(5): 784795. DOI [10.31857/S0030157423050076](https://doi.org/10.31857/S0030157423050076)

The content and distribution of natural (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) radionuclides in the model small lakes bottom sediments of different sedimentogenesis types (south of Western Siberia)



Ovdina E.A.*, Strakhovenko V.D., Malov G.I., Malov V.I.

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Akad Koptyug Ave. 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The assessment of the content and distribution of natural radionuclides (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) in stratified bottom sediments cores of the similar composition (silicon class) in model small lakes, taking into account the type of sedimentogenesis (humid, arid, and nival), in consistently changing landscape conditions of the south of Western Siberia, was carried out. In the bottom sediments of the model small lakes (silicon class) of the humid and arid sedimentogenesis type, the average content and distribution of Th, U and K are similar throughout the studied time interval (about 200 years). For bottom sediments in model lakes of the nival sedimentogenesis type, fluctuations in the average composition along the core, as well as generally higher Th and U contents, are observed.

Keywords: bottom sediments, small lakes, natural radionuclides, nival type of sedimentogenesis

For citation: Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Malov G.I., Malov V.I. The content and distribution of natural (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) radionuclides in the model small lakes bottom sediments of different sedimentogenesis types (south of Western Siberia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 499-504. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-499](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-499)

1. Introduction

The bottom sediments of the studied small lakes are sapropel and mineral silt. According to (Strakhov, 1960), there are four main types of sedimentogenesis — humid, arid, nival and volcanogenic-sedimentary (azonal). According to (Shtin, 2005), the intensity of sapropel formation correlates with the sedimentogenesis type. The humid type correlates with the zone of intensive sapropel accumulation in subtaiga and forest-steppe landscapes. In the zones of arid sedimentation, the most common type of bottom sediments is brackish sapropel and mineral silt. The nival type of sedimentogenesis correlates with the azonal territories of weak sapropel accumulation in the mid-mountain and high-mountain territories.

The study of the natural radionuclides distribution in the lacustrine bottom sediments makes it possible to assess the sources of the material and the degree of its differentiation. The radionuclides concentration in the lakes sediments and the soils of their catchment depends on their content in the underlying rocks. Consideration of the accumulation features of U and Th in lake ecosystems, taking into account the types of sedimentogenesis and landscape conditions, will allow us to give background estimates for different catchments, which is necessary to identify natural and man-made anomalies.

The aim of the work is to assess the content and distribution of natural (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) radionuclides in stratified bottom sediments cores of the similar composition in model small lakes of the humid, arid and nival type of sedimentogenesis in the south of Western Siberia along the meridional and high-altitude transects (\approx meridional transect $78^\circ + 3^\circ$ E and from 51° to 57° N and from 125 to 3000 m a.s.l.).

2. Materials and Methods

To select model objects, data on 81 lakes in the south of Western Siberia of three sedimentogenesis types were used – humid (subtaiga of the Vasyugan plain and forest-steppe of the Baraba lowland), arid (ribbon forest and steppe of the Kulunda plain) and nival (middle mountains and highlands of the Altai Mountains, Ukok plateau). The choice was based on the classification of sediments by class (Strakhovenko

*Corresponding author.

E-mail address: ovdina@igm.nsc.ru (E.A. Ovdina)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



et al., 2022). Small lakes with silicon sapropel class are identified as model lakes, because for the studied lakes it is the most widespread and informative, developing in each type of sedimentogenesis and landscape. There are 21 lakes in the humid type of sedimentogenesis, 9 in the arid type and 10 small lakes in the nival type.

Bottom sediment sampling was carried out in the center of the lake from the PVC boat “Stormline Adventure” (South Korea) using a cylindrical sampler ($\varnothing=82$ mm, L=120 cm) with a vacuum seal (Taifun RPA, Russia). The bottom sediment cores were tested in 5 cm thick layers. Analytical studies of the lake components were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Determination of the natural (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) radionuclides was carried out by gamma-spectrometric method on a well coaxial detector made of ultrapure germanium (HPGe) with a preamplifier and a low-background cryostat EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA (Eurysis Mesures, France). The major element composition was determined by X-ray fluorescence analysis (ARL-9900-XP, Applied Research Laboratories, USA).

3. Results and Discussion

The distribution of natural radionuclides in bottom sediments of the studied area (silicon class, humid and arid types of sedimentogenesis) is quite homogeneous and consistent throughout the entire time interval studied (approximately 200 years) (Fig.1, Table 1). This can be explained by the high homogeneity of the substrate in the catchment areas of the Baraba lowland and Kulunda plain, which is determined by the com-

position of the bedrock in the Altai-Sayan Mountain System (Strakhovenko et al., 2022). For lakes with nival sedimentogenesis, higher Th and U concentrations are generally observed, as well as co-directional distribution patterns, which may indicate a common source of supply.

Such a source is likely the terrigenous material from the catchment areas. The movement of sedimentary material in the nival type of sedimentation, the accumulation of coarse and unsorted clastic deposits, and the fragmentation of rocks into aleuopelitic and pelitic sizes occur mainly due to physical and cryogenic weathering processes. These processes ultimately lead to the formation of rocks and sediments that consist of more than 95% detrital material, with the influence of biogenic and chemical processes significantly reduced (Geological Dictionary, 2010). The higher concentrations of Th and U in bottom sediments from nival sedimentation (Tab. 1) compared to humid and arid areas are likely associated with a higher proportion of terrigenous pelitic material formed under cryolithogenic conditions. The dependence of the Th and U content on the granulometric composition of rocks can be observed in terrigenous sediments – the smaller the particle size, the higher the concentration of radioactive elements (Smyslov, 1974). However, in areas of humid and dry sedimentation, the concentrations of Th and U are influenced by both the terrigenous and biogenic components, with the latter playing a minimal role in glacial sedimentogenesis. Fluctuations in the concentrations of natural radionuclides in bottom sediments during glacial sedimentation may be linked to uneven input of terrigenous material to the lake.

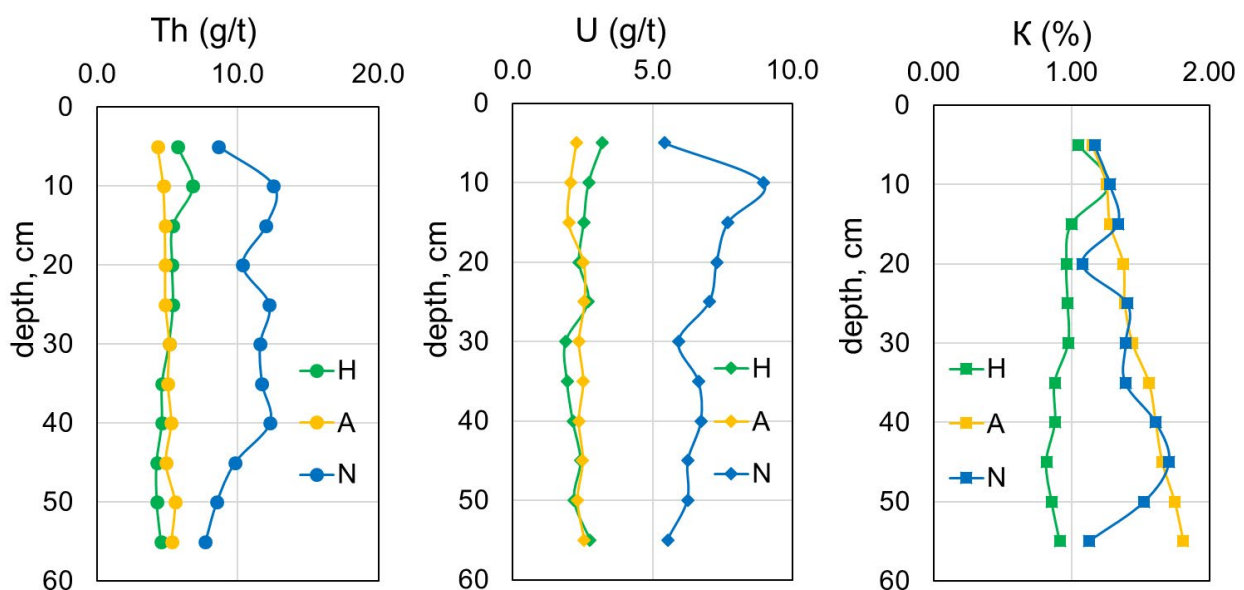


Fig.1. Distribution of Th (g/t), U (g/t) and K (%) in averaged vertical sediment cores in model small lakes (silicon class) in the south of Western Siberia. There are three types of sedimentogenesis: H – humid, A – arid, and N - nival.

Table 1. Th (g/t), U (g/t) and K (%) contents in averaged vertical sediments sections of model small lakes (silicon class) in the south of Western Siberia of the three sedimentogenesis types

Sedimentogenesis type	Th, (g/t)	U, (g/t)	K, (%)
Humid	5.0 ± 0.7	2.4 ± 0.4	$1.0 - 0.1$
	4.3 – 6.8	1.9 – 3.2	0.8 – 1.3
Arid	5.0 ± 0.3	2.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2
	4.3 – 5.5	2.0 – 2.6	1.2 – 1.8
Nival	9.7 ± 1.8	6.2 ± 1.5	1.4 ± 0.2
	7.4 – 12.6	3.7 – 8.9	1.1 – 1.7

Note: the numerator is the average \pm s.d., denominator – minimum – maximum

4. Conclusion

The average content and distribution pattern of natural (Th, U, K) radionuclides in the bottom sediments of model small lakes of the silicon class of the humid and arid type of sedimentation in the south of Western Siberia are similar throughout the entire studied time interval (about 200 years). For bottom sediments of the silicon class of model lakes of the nival type of sedimentogenesis, fluctuations in the average composition along the section are traced, which is associated with uneven time flow of terrigenous material into the lake. Higher Th and U contents are associated with a higher content of the terrigenous fraction of the pelite dimension formed under cryolithogenesis conditions.

Acknowledgements

This research was funded by the Russian Science Foundation (grant № 23-27-00111), <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Geological dictionary. 2010. In three volumes. Third edition revised and add. In: Petrov O.V (Ed.). Vol. 1. SPb: Izd-vo VSEGEI. (in Russian)
- Shtin S.M. 2005. Ozerne sapropeli i osnovy ikh kompleksnogo osvoeniya [Lake Sapropels and those complex cultivation]. Moscow: Moscow State Mining University. (in Russian)
- Strakhov N.M. 1960. Osnovy teorii litogeneza [Fundamentals of the lithogenesis theory]. Vol. 1. Moscow: Izd-vo AS USSR. (in Russian)
- Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malikova I.N. et al. 2022. Radioactivity Assessment of Sapropel Sediments in Small Lakes in the Baraba Lowland and Kulunda Plain, West Siberia. *Geochemistry International* 60: 792–807. DOI: [10.1134/S0016702922080080](https://doi.org/10.1134/S0016702922080080)
- Smyslov A.A. 1974. Uran i torij v zemnoj kore [Uranium and thorium in the Earth's crust]. Leningrad: Nedra. (in Russian)

Содержание и характер распределения естественных (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) радионуклидов в донных отложениях модельных малых озер разного типа седиментогенеза (юг Западной Сибири)



Овдина Е.А.*, Страховенко В.Д., Малов Г.И., Малов В.И.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведена оценка содержания и характера распределения естественных радионуклидов (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) в стратифицированных разрезах однотипных донных отложений модельных малых озер (кремниевый класс) с учетом типа седиментогенеза (гумидный, аридный, нивальный), в последовательно сменяющихся ландшафтных условиях юга Западной Сибири. В донных отложениях модельных малых озер кремниевого класса гумидного и аридного типа седиментогенеза среднее содержание и характер распределения Th, U и K схожи на протяжении всего исследуемого временного интервала (около 200 лет). Для донных отложений кремниевого класса модельных озер нивального типа седиментогенеза прослеживаются флуктуации среднего состава по разрезу, а также в целом более высокие содержания Th и U.

Ключевые слова: донные отложения, малые озера, естественные радионуклиды, нивальный тип седиментогенеза

Для цитирования: Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Малов Г.И., Малов В.И. Содержание и характер распределения естественных (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) радионуклидов в донных отложениях модельных малых озер разного типа седиментогенеза (юг Западной Сибири) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 499-504. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-499

1. Введение

Донные отложения исследуемых малых озер являются сапропелем и минеральным илом. Согласно (Страхов, 1960), существует четыре основных типа седиментогенеза — гумидный, аридный, нивальный и вулканогенно-осадочный (азональный). По (Штин, 2005) интенсивность сапропелеобразования коррелирует с типами седиментогенеза. Гумидный тип коррелирует с зоной интенсивного накопления сапропеля в подтаежных и лесостепных ландшафтах. В зонах аридного седиментогенеза наиболее распространенным типом донных отложений является солоноватый сапропель и минеральный ил. Нивальный тип седиментогенеза коррелирует с азональными территориями слабого накопления сапропеля на среднегорных и высокогорных территориях.

Изучение распределения естественных радионуклидов в донных отложениях озер дает возможность оценить источники привноса вещества и степень его дифференциации. Концентрация радионуклидов в донных отложениях озер и почвах их

водосборных площадей зависит от их содержания в подстилающих породах. Рассмотрение особенностей аккумуляции U и Th в озерных экосистемах с учетом типов седиментогенеза и ландшафтных условий позволит дать фоновые оценки для разных водосборов, что необходимо для выявления природных и техногенных аномалий.

Целью работы является оценка содержания и характера распределения естественных (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) радионуклидов в стратифицированных разрезах однотипных донных отложений модельных малых озер гумидного, аридного и нивального типа седиментогенеза юга Западной Сибири вдоль меридионального и высотного трансектов (\approx меридионального трансекта $78^\circ + 3^\circ$ в.д. и от 51° до 57° с.ш. и высоты над уровнем моря от 125 до 3000 м).

2. Материалы и Методы

Для выбора модельных объектов использованы данные по 81 озеру юга Западной Сибири трех типов седиментогенеза – гумидный (подтайга

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ovdina@igm.nsc.ru (Е.А. Овдина)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Васюганской равнины и лесостепь Барабинской низменности), аридный (ленточный бор и степь Кулундинской равнины) и нивальный (среднегорье и высокогорье Горного Алтая, плато Укок). Выбор основывался на классификации донных отложений по классам (Страховенко и др., 2022). Модельными озерами выделены малые озера с кремниевым классом сапропеля, т.к. для изученных озер он наиболее распространен и информативен, развивается в каждом типе седиментогенеза и ландшафта. В гумидном типе седиментогенеза выделено 21 озеро, в аридном – 9, в нивальном – 10 малых озер.

Отбор проб донных отложений проводился в центре озера с лодки с использованием цилиндрического пробоотборника ($\varnothing=82$ мм, $L=120$ см) с вакуумным затвором (НПО Тайфун, Россия). Образцы донных отложений были исследованы слоями толщиной 5 см.

Аналитические исследования компонентов озера проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия. Определение естественных радионуклидов (^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K) проводили гамма-спектрометрическим методом на колодезном коаксиальном детекторе из сверхчистого германия (HPGe) с преусилителем и низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA («Eurysis Mesures», Франция)

3. Результаты и Обсуждение

Распределение естественных радионуклидов по глубине донных отложений кремниевого класса гумидного и аридного типа седиментогенеза довольно однородно и схоже на протяжении всего исследуемого временного интервала (около 200 лет) (Рис. 1, Таблица 1). Это связано с высокой гомогенизацией субстрата водосборных площадей на территориях Барабинской низменности и Кулундинской равнины, который определяется составом коренных

пород Алтае-Саянской горной системы и Казахского мелкосопочника (Страховенко и др., 2022). Для озер нивального типа седиментогенеза прослеживаются в целом более высокие содержания Th и U, а также сопоставленность графиков распределения, что может говорить об едином источнике поступления.

Таким источником, скорее всего, является терригенный материал площадей водосбора. Мобилизация осадочного вещества при нивальном типе седиментогенеза, накопление грубо- и крупнозернистых несортированных обломочных отложений и дробление горных пород до размеров алевропелитов и пелитов происходят в основном за счет физического и криогенного выветривания. Эти процессы в конечном итоге приводят к образованию горных пород и отложений, которые более чем на 95% состоят из обломочной фракции, в то время как влияние биогенных и хемогенных процессов значительно снижается (Геологический словарь, 2010). Более высокие содержания Th и U в донных отложениях нивального седиментогенеза по сравнению с гумидным и аридным типами (Таб. 1), скорее всего, связаны с более высоким содержанием терригенной фракции пелитовой размерности, сформированной в условиях криолитогенеза. Зависимость содержания Th и U от гранулометрического состава пород прослеживается в терригенных осадках – чем меньше размерность, тем выше содержание радиоактивных элементов (Смыслов, 1974). Однако, в зоне гумидного и аридного типа седиментогенеза зависимости содержания Th и U связаны как с терригенной составляющей, так и с биогенной, роль которой в нивальном седиментогенезе минимальна. Флуктуации содержания естественных радионуклидов по разрезу донных отложений кремниевого класса при нивальном седиментогенезе могут быть связаны с неравномерным во времени поступлением терригенного материала в озеро.

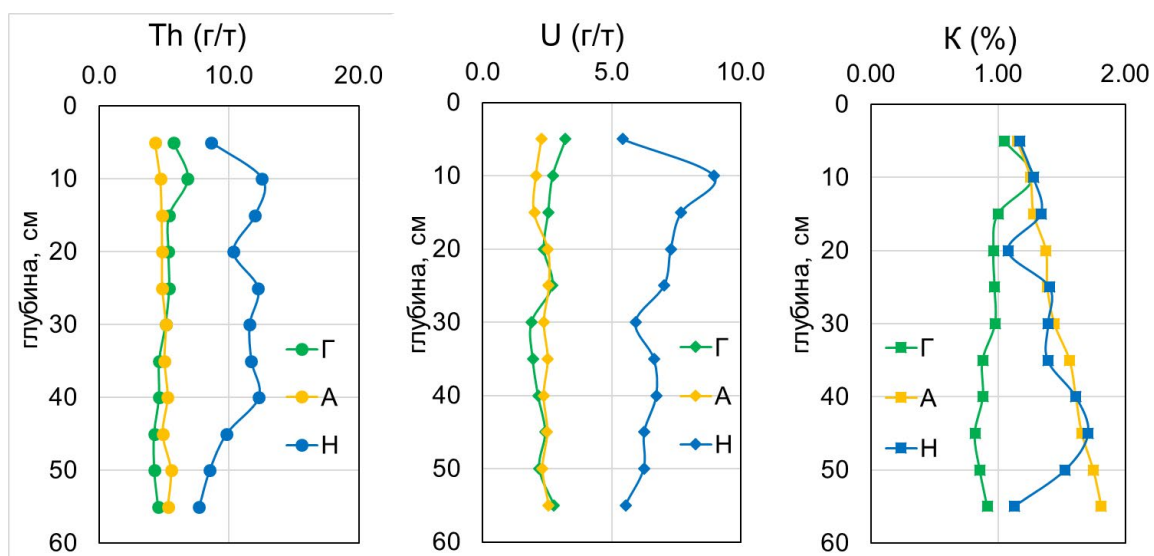


Рис.1. Распределение естественных радионуклидов Th (г/т), U (г/т) и K (%) в усредненных вертикальных разрезах донных отложений модельных малых озер (кремниевого класса) юга Западной Сибири трех типов седиментогенеза: Г – гумидный, А – аридный, Н - нивальный.

Таблица 1. Среднее содержание естественных радионуклидов в усредненных вертикальных разрезах донных отложений модельных малых озер (кремниевого класса) юга Западной Сибири трех типов седиментогенеза.

Тип седиментогенеза	Th, (г/г)	U, (г/г)	K, (%)
гумидный	5.0 ± 0.7	2.4 ± 0.4	$1.0 - 0.1$
	4.3 – 6.8	1.9 – 3.2	0.8 – 1.3
аридный	5.0 ± 0.3	2.4 ± 0.2	1.5 ± 0.2
	4.3 – 5.5	2.0 – 2.6	1.2 – 1.8
нивальный	9.7 ± 1.8	6.2 ± 1.5	1.4 ± 0.2
	7.4 – 12.6	3.7 – 8.9	1.1 – 1.7

Примечание: числитель – средн. \pm станд.откл, знаменатель – минимум - максимум

4. Заключение

Среднее содержание и характер распределения естественных (Th, U, K) радионуклидов в донных отложениях модельных малых озер кремниевого класса гумидного и аридного типа седиментогенеза на юге Западной Сибири схоже на протяжении всего исследуемого временного интервала (около 200 лет). Для донных отложений кремниевого класса модельных озер нивального типа седиментогенеза прослеживаются флуктуации среднего состава по разрезу, что связано с неравномерным во времени поступлением терригенного материала в озеро. Более высокие содержания Th и U связаны с более высоким содержанием терригенной фракции пелитовой размерности, сформированной в условиях криолитогенеза.

5. Финансирование

Данное исследование было профинансировано Российским научным фондом (грант № 23-27-00111), <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- Геологический словарь. 2010. В: Петров О.В. (ред). В трех томах. Издание третье, перераб. и доп. Т. 1. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ.
- Штин С.М. 2005. Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. Москва: Изд-во Московского государственного горного университета.
- Страхов Н.М. 1960. Основы теории литогенеза. Т. 1. Москва: Изд-во АН СССР.
- Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Маликова И.Н. и др. 2022. Радиационная оценка сапропелевых отложений малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины (Западная Сибирь). *Геохимия* 67(8): 787-804. DOI: [10.31857/S0016752522080088](https://doi.org/10.31857/S0016752522080088)
- Смыслов А.А. 1974. Уран и торий в земной коре. Ленинград: Недра.

Diatom-based reconstruction of Lake Turgoyak (Southern Urals) ecosystem changes in the Holocene

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Maslennikova A.V.*

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences, ter. Ilmeny Nature Reserve, Miass, Chelyabinsk region, 456317, Russia

ABSTRACT. Lake Turgoyak development through more than 12 thousand years was studied based on diatom analysis of the lake sediment core. Altogether 142 diatom taxa were identified. Four diatom zones corresponding to main stages of the lake ecosystem development were distinguished with application of stratigraphically constrained cluster analysis. It was found that in the period from 12.1 to 11.0 cal ka BP Lake Turgoyak had maximum salinity and a high degree of overgrowth with hydrophytes. Desalination and an increase in the lake depth occurred between 11.0 and 7.7 cal ka BP. Substantial fluctuations of the lake parameters about 8.0-7.0 cal ka BP were followed by period of lower flow rate and accumulation of sediments with a high content of organic matter. Approximately 2.7 ka cal BP the lake depth increased and salinity decreased. It was concluded that the chronological boundaries of the main stages of the lake ecosystem development coincide with the climatic events previously determined for the Holocene and Late Glacial of the Urals.

Keywords: Diatoms, sediment core, Holocene, Urals, Lake Turgoyak, paleolimnological reconstructions

For citation: Maslennikova A.V. Diatom-based reconstruction of Lake Turgoyak (Southern Urals) ecosystem changes in the Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 505-509. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-505

1. Introduction

Diatom analysis of lake sediments is necessary for the reconstruction of lake-water parameters and study of history of lake ecosystem development. The diatom analysis of Lake Turgoyak was previously carried out only for a short lake sediment core covering a period of several hundred years (Maslennikova et al., 2023). Diatom analysis of several more ancient samples showed strong differences in the diatom assemblages composition of various types of the lake sediments (Maslennikova et al., 2018). The objective of this research is to reconstruct the main stages of the Lake Turgoyak development for over 12 cal ka BP based on detailed diatom analysis of sediment core.

2. Methods

The sediment core (55°16'81.70"N, 60°05'48.10"E) with a thickness of 265 cm was collected from Lake Turgoyak at 19 m water depth. A sampling interval varied from 1 to 5 cm. The samples were treated with nitric and perchloric acids to remove

organic matter. A Mikmed 6 var. 7 microscope with bright-field oil immersion optics at 1000× magnification was used for counting. At least 300 valves were counted per sample (diatom total) to determine a relative abundance (percentage) of individual taxa in the assemblages. Ecological groups in relation to pH, saprobity, trophicity, salinity were identified according to (Van Dam et al., 1994) Benthic, plankton-benthic, and planktonic diatoms were distinguished in terms of a habitat according to (Barinova et al., 2006). The ecological information from the study of 107 lakes of the Middle and Southern Urals was applied as well (Gulakov and Maslennikova, 2024). The diatom zonation scheme was developed with a stratigraphically constrained cluster analysis Tilia software package (Grimm, 1991).

3. Results

Altogether 142 diatom species and varieties were identified by diatom analysis of the Lake Turgoyak sediment core. Benthic diatoms (118 species) in lake sediments were the most diverse. In total, 8 plankton-benthic and 16 planktonic diatom species were found in the

*Corresponding author.

E-mail address: adenophora@inbox.ru (A.V. Maslennikova)

Received: May 27, 2024; Accepted: July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



lake sediment core. The abundance of habitat groups varied in different stages of the lake development.

In relation to pH, most species were alkaliphilic; in terms of saprobity, oligosaprobies and β -mesosaprobies inhabiting in waters saturated by oxygen (not less than 75%); in terms of trophic state, from oligotrophic to eutrophic; and in terms of salinity, oligohalobes. The four diatom zones were distinguished.

DZ-I (12.2-11.0 cal ka BP (calibrated years ago)). *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round 1988 and *Gomphonema angustum* C. Agardh 1831 are dominated. Species preferring of high salinity waters (*Mastogloia elliptica* (C. Agardh) Cleve in A.W.F. Schmidt 1893, *Navicula oblonga* (Kützing) Kützing 1844, *Rhoicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bertalot 1980) as well as diatoms often inhabiting of shallow overgrown by submerged vegetation alkaline lakes of the Urals (*Mastogloia lacustris* (Grunow) Grunow in Van Heurck 1880, *Nitzschia denticula* Grunow 1880) are constantly found.

DZ-II (11.0-7.7 cal ka BP) is characterized by the highest abundance of *Ellerbeckia arenaria* (G. Moore ex Ralfs) R.M. Crawford 1988 and *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova 1999. The beginning of the zone (11.0-10.3 cal ka BP) is distinguished by substantial abundance of attached species (*Epithemia frickei* Krammer in Lange-Bertalot & Krammer 1987, *Amphora indistincta* Levkov 2009, *A. pediculus* (Kützing) Grunow in A.W.F. Schmidt 1875).

DZ-III (7.7-2.7 cal ka BP) is distinguished by increase in *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D. Möller 1879 and *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams & Round 1987. An abundance of *Staurosira venter*, *Cocconeis neothumensis* Krammer 1990, and *C. disculus* (Schumann) Cleve in Cleve & Jentzsch 1882 between 8.0 and 7.0 cal ka BP fluctuating substantially.

DZ-IV (2.7 cal ka BP-present) is marked by an increase in planktonic diatoms (*Handmannia comta* (Ehrenberg) Kociolek & Khursevich emend. Genkal 2013, *Stephanodiscus alpinus* Hustedt in Huber-Pestalozzi 1942), *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve 1894 and *Eolimna metafarta* Kulikovskiy & Lange-Bertalot in Kulikovskiy & al. 2015 appeared and constantly presented.

4. Discussion

Diatom assemblages reflect Lake Turgoyak ecosystem shifts for the period for over 12 cal ka BP. About 12.1-11.2 cal ka BP the lake had the highest salinity and substantial degree of overgrowth by submerged vegetation due to its shallowness in comparison with the present time. The disappearance of diatoms with a high salinity optimum indicates the lake desalination about 11.0 cal ka BP. Decrease in epiphytic diatoms and increase in epilithic species relates to lowering of submerged vegetation due to the lake deepening about 10.3 cal ka BP. Abrupt changes in diatom assemblages during the 7-8 cal ka BP period can be explained by rapid climatic fluctuations. The shift at 7.7 cal ka BP associates with decrease in the flow rate and increase in

accumulation of organic-rich sediments. Higher planktonic diatoms and change in the species composition at 2.7 cal ka BP indicate an increase of the lake level and decrease in salinity. The chronological boundaries of the main stages the Lake Turgoyak and several other lakes of the Southern and Middle Urals development coincide, which is associated with climate changes at this time (Maslennikova, 2020; 2022).

5. Conclusions

Thus, the diatom analysis of the Lake Turgoyak sediment core revealed four main stages of the ecosystem development. The chronological boundaries of the stages coincide with the previously reconstructed climate events in the Holocene of the Urals.

Acknowledgements

The authors thank Valery Nikolaevich Udachin (SU FRC MG UB RAS) and Vladimir Vladislavovich Deryagin (CSPU) for the lake sediment core collection.

Conflict of interests

The author declares no conflicts of interest.

References

- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anissimova O.V. 2006. Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy [Diversity of Algal Indicators in Environmental Assessment]. Tel-Aviv: Pilies Studio Press. (in Russian)
- Grimm E.C. 1991. Tilia 1.12, Tilia Graph 1.18. Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield.
- Gulakov V.O., Maslennikova A.V. 2024. Practical aspects of digitalization of limnological and paleolimnological studies. Transactions of the Kola Science Centre of RAS Series: Natural Sciences and Humanities 3 (1): 16-20. (in Russian)
- Maslennikova A.V. 2022. Holocene environments in the Middle Urals: Palaeolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia). Quaternary International 622: 51-64. DOI:[10.1016/j.quaint.2022.02.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.033)
- Maslennikova A.V. 2020. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms from lakes in the Urals, Russia. J Paleolimnol 63 (2): 129-146. DOI:[10.1007/s10933-019-00106-z](https://doi.org/10.1007/s10933-019-00106-z)
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. et al. 2018. Reconstruction of Lake Turgoyak (Southern Urals) ecosystem changes in Holocene. Litosfera (6): 914-927. DOI:[10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927) (in Russian)
- Maslennikova A.V., Udachin V.N., Deryagin V.V. et al. 2023. Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia). Hydrobiologia 850 (7): 1669-1698. DOI:[10.1007/s10750-023-05177-8](https://doi.org/10.1007/s10750-023-05177-8)
- Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. Netherlands Journal of Aquatic Ecology 28 (1): 117-133. DOI:[10.1007/BF02334251](https://doi.org/10.1007/BF02334251)

Диатомовая летопись изменений экосистемы озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Масленникова А.В.*

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, 456317, Челябинская область, г. Миасс, Ильменский заповедник

АННОТАЦИЯ. На основе диатомового анализа колонки донных отложений, охватывающей более 12 тыс. лет, изучена история изменений экосистемы оз. Тургояк. В донных отложениях идентифицировано 142 вида и разновидности диатомовых водорослей. С помощью кластерного анализа выделено четыре диатомовые зоны, соответствующие основным этапам развития озера. Установлено, что в период от 12.1 до 11.0 тыс. к.л.н. оз. Тургояк имело максимальную минерализацию и высокую степень зарастания гидрофитами. В период 11.0-7.7 тыс. к.л.н. произошло опреснение и возрастание глубины озера. После резких колебаний параметров оз. Тургояк около 8-7 тыс. к.л.н. его проточность уменьшилась, начали накапливаться донные отложения с высоким содержанием органического вещества. Около 2.7 тыс. к.л.н. глубина озера увеличилась, а минерализация снизилась. Сделан вывод, что хронологические границы выделенных этапов развития озерной экосистемы совпадают с климатическими событиями, определенными ранее для голоцена и позднеледниковья Урала.

Ключевые слова: Диатомовые водоросли, колонка донных отложений, голоцен, Урал, озеро Тургояк, палеолимнологические реконструкции

Для цитирования: Масленникова А.В. Диатомовая летопись изменений экосистемы озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 505-509. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-505

1. Введение

Изучение диатомовых комплексов донных отложений озер необходимо для реконструкции гидрохимических параметров озер и исследования истории развития озера. Диатомовый анализ озера Тургояк ранее проводился только для короткой колонки донных отложений, охватывающей период в несколько сотен лет (Maslennikova et al., 2023). Для более древних отложений был сделан диатомовый анализ нескольких образцов, показавший сильные отличия состава диатомовых комплексов различных типов отложений оз. Тургояк (Масленникова и др., 2018). Целью данной работы является подробный диатомовый анализ колонки донных отложений оз. Тургояк, охватывающей последние 12 тыс. лет, для реконструкции основных этапов развития озерной экосистемы.

2. Методы

Колонка донных отложений (55°16'81.70» с.ш. 60°05'48.10» в.д.) мощностью 265 см была отобрана в оз. Тургояк с глубины 19 м. Образцы, отобранные через 1-5 см, обрабатывались смесью азотной и хлорной кислот для удаления органического вещества. На световом микроскопе Микмед-6 вар. 7 при увеличении в 1000 раз было подсчитано не менее 300 створок диатомей в каждом препарате. На основе литературных источников виды разделялись по отношению к рН, галобности, сапробности, трофности (Van Dam et al., 1994) и по местообитанию (Барина и др., 2006). При реконструкциях учитывалась информация, полученная при изучении 107 озер Среднего и Южного Урала (Гулаков и Масленникова, 2024). Диатомовые зоны выделены с помощью кластерного анализа с учетом стратигра-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: adenophora@inbox.ru (А.В. Масленникова)

Поступила: 27 мая 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



фических ограничений. Кластерный анализ проведен в программе Tilia (Grimm, 1991).

3. Результаты

В результате изучения колонки донных отложений оз. Тургояк найдено 142 вида и разновидности диатомовых водорослей. Группа бентосных видов наиболее разнообразна (118 видов). Планктонных видов найдено 16, а планктонно-бентосных - 8. Обилие бентосных, планктонных и планктонно-бентосных видов варьирует в различные периоды развития озера. Виды диатомей в основном представлены олигогалолами, алкалифилами, олигосапробами, β -мезосапробами, обитающими в водах насыщенных кислородом (не менее 75%). Идентифицированные диатомовые водоросли предпочитают водоемы от олиготрофного до эвтрофного трофического статуса. С помощью кластерного анализа выделено четыре основные диатомовые зоны.

DZ-I (12.2-11.0 тыс. к.л.н. (календарных лет назад)). Доминирует *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round 1988 и *Gomphonema angustum* C. Agardh 1831. Постоянно отмечаются виды, предпочитающие водоемы с повышенной минерализацией (*Mastogloia elliptica* (C. Agardh) Cleve in A.W.F. Schmidt 1893, *Navicula oblonga* (Kützing) Kützing 1844, *Rhoicosphenia abbreviata* (C. Agardh) Lange-Bertalot 1980), а также диатомовые водоросли в большом количестве встречающиеся в неглубоких, заросших ризоидными диатомовыми водорослями алкалинных водоемах Урала (*Mastogloia lacustris* (Grunow) Grunow in Van Heurck 1880, *Nitzschia denticula* Grunow 1880).

DZ-II (11.0-7.7 тыс. к.л.н.) отличается доминированием *Ellerbeckia arenaria* (G. Moore ex Ralfs) R.M. Crawford 1988 и *Karayevia clevei* (Grunow) Bukhtiyarova 1999. Для начала зоны (11.0-10.3 тыс. к.л.н.) характерно большое количество бентосных прикрепляющихся видов (*Epithemia frickei* Krammer in Lange-Bertalot & Krammer 1987, *Amphora indistincta* Levkov 2009, *A. pediculus* (Kützing) Grunow in A.W.F. Schmidt 1875).

DZ-III (7.7-2.7 тыс. к.л.н.) характеризуется возрастанием содержания *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D. Möller 1879 и *Staurosirella lapponica* (Grunow) D.M. Williams & Round 1987. В интервале от 8.0 до 7.0 тыс. к.л.н. отмечаются резкие колебания численности видов *Staurosira venter*, *Cocconeis neothumensis* Krammer 1990, *C. disculus* (Schumann) Cleve in Cleve & Jentzsch 1882.

DZ-IV (2.7 тыс. к.л.н.-настоящее время) отличается значительным возрастанием содержания планктонных диатомей (*Handmannia comta* (Ehrenberg) Kociolek & Khursevich emend. Genkal 2013, *Stephanodiscus alpinus* Hustedt in Huber-Pestalozzi 1942). Для зоны характерно появление и постоянное присутствие *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve 1894, *Eolimna metafarata* Kulikovskiy & Lange-Bertalot in Kulikovskiy & al. 2015.

4. Обсуждение

Диатомовые комплексы отражают изменения оз. Тургояк за период более 12 тысяч лет. Около 12.1-11.2 тыс. к.л.н. озеро имело самую высокую минерализацию за изученный период развития и значительную степень зарастания гидрофитами, что указывает на более низкий уровень озера в сравнении с настоящим временем. Исчезновение диатомовых водорослей, имеющих сравнительно высокий оптимум минерализации, около 11.0 тыс. к.л.н. свидетельствует об опреснении озера. Уменьшение количества эпифитов и возрастание содержания створок эпилитов указывает на снижение роли гидрофитов 10.3 тыс. к.л.н. из-за увеличения глубины озера. Резкие изменения диатомовых комплексов в период 7-8 тыс. к.л.н. могут быть объяснены быстрыми климатическими колебаниями. Смена диатомовых комплексов около 7.7 тыс. к.л.н. предположительно связана с уменьшением проточности водоема, увеличением количества ила на дне озера. Возрастание роли планктонных видов и изменение видового состава диатомей 2.7 тыс. к.л.н. свидетельствуют о повышении уровня и уменьшении минерализации озера. Отмечается совпадение хронологических границ основных этапов развития озера Тургояк и других озер Южного и Среднего Урала, что связано с изменениями климата в это время (Maslennikova, 2020; 2022).

5. Выводы

Таким образом, на основе диатомового анализа донных отложений оз. Тургояк выявлено четыре основных этапа развития экосистемы, хронологические границы которых совпадают с реконструированными ранее событиями голоцена Урала.

Благодарности

Автор выражает благодарность Валерию Николаевичу Удачину (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН) и Владимиру Владиславовичу Дерягину (ЮУрГГПУ) за отбор колонки донных отложений.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- Grimm E.C. 1991. Tilia 1.12, Tilia Graph 1.18. Illinois State Museum. Research and Collection Center, Springfield.
- Maslennikova A.V. 2022. Holocene environments in the Middle Urals: Palaeolimnological proxies from the Lake Tavatui (Russia). *Quaternary International* 622: 51-64. DOI: [10.1016/j.quaint.2022.02.033](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2022.02.033)
- Maslennikova A.V. 2020. Development and application of an electrical conductivity transfer function, using diatoms

from lakes in the Urals, Russia. *J Paleolimnol* 63 (2): 129-146. DOI:[10.1007/s10933-019-00106-z](https://doi.org/10.1007/s10933-019-00106-z)

Maslennikova A.V., Udachin V., Deryagin V. et al. 2023. Sediment records of lake eutrophication and oligotrophication under the influence of human activity and climate warming in the Urals metallurgical region (Russia). *Hydrobiologia* 850 (7): 1669-1698. DOI:[10.1007/s10750-023-05177-8](https://doi.org/10.1007/s10750-023-05177-8)

Van Dam H., Mertens A., Sinkeldam J. 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology* 28 (1): 117-133. DOI:[10.1007/BF02334251](https://doi.org/10.1007/BF02334251)

Баринаева С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio Press.

Гулаков В.О., Масленникова А.В. 2024. Практические аспекты цифровизации лимнологических и палеолимнологических исследований. Труды Кольского научного центра РАН Серия: Естественные и гуманитарные науки 3 (1): 16-20.

Масленникова А.В., Удачин В.Н., Дерягин В.В. и др. 2018. Реконструкция этапов развития озера Тургояк (Южный Урал) в голоцене. *Литосфера* (6): 914-927. DOI:[10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-6-914-927)

The influence of the Caspian Sea level fluctuations and river channels network dynamics in the Volga River delta on the location and development of Khazar settlements of the Semibugorinsky archaeological complex

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Matlakhova E.Yu.^{1*}, Makshaev R.R.¹, Lobacheva D.M.¹, Lysenko E.I.¹,
Tkach A.A.¹, Tkach N.T.², Koten'kov S.A.³, Soloviev D.S.⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

³ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky Avenue, 36, Moscow, 117997, Russia

⁴ LLC "Archeocenter", pl. Lenina, 2, Astrakhan, 414000, Russia

ABSTRACT. The results of the comprehensive studies of the Semibugorinsky archaeological complex in the central part of the Volga River delta make it possible to reconstruct the influence of the fluctuations of the Caspian Sea level and the dynamics of the channel network at the development of Khazar settlements in the 6th-10th centuries. During the period of the Caspian Sea level rise (-24 m abs.), part of the population, presumably, moved to the Baer knolls, which at that time became islands. The Volga River delta was located at the higher levels, which could lead to the resettlement of the part of the population to its northern periphery.

Keywords: Paleogeography of the Volga River delta, fluctuations of the Caspian Sea level, dynamics of the channel network, natural conditions of the Khazar settlements existence

For citation: Matlakhova E.Yu., Makshaev R.R., Lobacheva D.M., Lysenko E.I., Tkach A.A., Tkach N.T., Koten'kov S.A., Soloviev D.S. The influence of the Caspian Sea level fluctuations and river channels network dynamics in the Volga River delta on the location and development of Khazar settlements of the Semibugorinsky archaeological complex // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 510-515. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-510

1. Introduction

The dynamics of the natural environment of the Volga River delta is closely related to the fluctuations of the Caspian Sea level. The changes of the environment determined the conditions of human settlements existence. Over the past 2 millennia, the Caspian Sea coastlines have experienced repeated changes ranging from -34 to -20 m abs. heights (Leontyev, 1959; Gumilev, 1980; Varushchenko et al., 1987; Svitoch, 2014). These fluctuations led to changes in paleogeographical conditions, the river channels network and the conditions of existence of ancient states and settlements on this territory.

2. Study area and methods

For several years the authors team made the field work together with the archaeological expedition of "Archeocenter" LLC and the Caspian branch of the Shirshov Institute of Oceanology RAS and studied the settlements of the Khazar Kaganate on the territory of the Semibugorinsky archaeological complex (Astrakhan region). Cultural layers with archaeological finds of red and gray clay ceramics, similar to the Saltovo-Mayak culture, date back to the 6th-10th centuries. In parallel with the work of archaeologists, our team made a complex lithological study of archaeological excavations, drilling and description of boreholes, sampling for various types of analyzes and laboratory processing

*Corresponding author.

E-mail address: matlakhovak@mail.ru (E.Yu. Matlakhova)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



of the obtained materials (lithological, geochemical, microfaunal and other analyses) to reconstruct the natural conditions of existence of Khazar settlements. The boreholes were made both on the surface of the Baer knolls and in mid-knolls depressions, and also within ancient channels and ilmens, which borders are sometimes traced on aerial photographs. In addition to interpreting aerial photographs, we made the analysis of old maps to estimate more recent changes in the channel network of the territory.

3. Results and conclusions

The complex study of sections, boreholes and topography of the territory, made it possible to reconstruct the conditions of Khazar settlements existence in the studied area. At the moment, three key sites of Early Medieval settlements have been studied in detail: Semibugri-1 (on the right bank of the River Bolda, 2 km east of the village of Semibugri), Baraniy Bugor (on the left bank of the River Bolda within the same named village) and Kerakle-Tobe (~ 8 km to the North from Baraniy Bugor village).

The excavations Semibugri-1 and Kerakle-Tobe are located on the Baer knolls. The first is located on the slope of the knoll (~ -23 -24 m abs.), the second - on the top of the knoll's surface (~ -16 m abs.). In the surrounding inter-knoll depressions hydromorphic soils, loams, sandy loams and sands with freshwater (*Unio sp.*, *Dreissena polymorpha*) and brackish-water (*Didacna barbotdemarnii*) shells were found. These sediments are connected with ilmens, delta channels, and ingression bays. It can be assumed that people settled on the knolls to avoid the flooding, which could be associated both with the rise of the Caspian Sea level and with the Volga River channels' migration. Also, the closeness of the settlements to the water and, probably, their location on the islands is confirmed by archaeological finds. For example, at the Semibugra-1 site there are finds indicating the presence of a large fishery (a large number of fish bones, etc.) within the settlement, as well as layers of rounded ceramics indicating a rise of the sea level, presumably in the second half of the 10th century.

The Baraniy Bugor excavation (BB5) is located at a lower hypsometric level (~-25 m abs.), within the alluvial plain on the left bank of the Bolda River. The surface on which the excavation is located, as well as the Baraniy Bugor village itself, is currently situated on unflooded level, several meters above the surrounding territories. The structure of excavation BB5 is represented by alternating cultural layers consisting of dark gray loams and light beige sandy loams and loams with inclusions of fragments and whole shells of the mollusks *Unio sp.*, *Viviparus sp.*, charcoal layers, animal bones, as well as fragments of red and gray clay ceramics of IX-X centuries. The excavation shows, presumably, the remains of a wall made of mud brick, running through the entire excavation and extending beyond its boundaries, which suggests the existence of an urban settlement here. In one of the walls of the excavation (from the side of the modern Bolda River) horizons of

light beige loams (up to 50-60 cm thick) can be traced, probably representing a system of ramparts designed to protect the settlement from floods. The remains of the ramparts are covered by cultural layers in which fragments of ceramics of the 9th-10th centuries, animal bones and in-situ shells of the mollusks *Dreissena rostriformis*, *Unio sp.* were found. This indicates subaquatic conditions of their accumulation.

According to the aerial photographs and historical maps, to the north and northeast of the Baraniy Bugor village, the outlines of ancient channels and ilmens can be traced. This surface was transformed during intensive agricultural development in the second half of the 20th century (rice paddies, abandoned in recent decades). Data from boreholes and excavation studies in this area indicate the presence of loams, sandy loams and sands, sometimes with shells of the mollusks *Dreissena polymorpha* and *Unio sp.* The composition of the layers represents sediments of floodplains, ilmens, delta channels, and, possibly, ingression bays.

Based on the analysis of the obtained data and their comparison with archaeological finds, we can say that the Khazar settlement in the Baraniy Bugor excavation area (BB5) was located in the conditions of a relatively intense hydrodynamic situation. This is proved by in-situ finds of shells of freshwater and brackish-water mollusks *Dreissena rostriformis*, *Viviparus sp.*, *Unio sp.*, a group of freshwater planktonic diatoms *Aulacoseira granulata* and *A. Italica*, as well as by the structure of sediments and cultural layers, and ancient ramparts in the excavation. Presumably, there was an ancient channel near the settlement. Its displacement led to the abandonment of the settlement, and destruction of the upper parts of the walls.

According to the data analysis we can assume that during the period of the existence of the settlements of the Volga Khazaria, they were repeatedly influenced by fluctuations of the Caspian Sea level and changes of the channel network in the study area. During the period of settlements existence (VIII - early X centuries), the level of the Caspian Sea was presumably located at low levels (-30 -33 m abs.), large spaces in the Volga River delta region were settling by human. During periods of rising levels of the Caspian Sea (VI-VII centuries, second half of the X century), some settlements were located on the Baer knolls, the other ones probably occupied areas in the upper northern parts of the Volga delta.

4. Acknowledgments

The authors thank the archaeological expedition of the Semibugorinsky archaeological complex for their assistance in organizing and conducting field work. The study was made within the framework of the state assignment of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University "Paleogeographic reconstructions of natural geosystems and forecasting their changes" (121051100135-0) and "Evolution of the natural environment in the Cenozoic, relief dynamics, geomorphological hazards and environmental management risks" (121040100323-5).

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Gumilev L.N. 1980. History of Caspian Sea level fluctuations over 2000 years (from the 4th century BC to the 16th century AD). In: Andrianov B.V., Zorin L.V., Nikolaeva R.V. (Ed.), *Fluctuations in the humidity of the Aral-Caspian region in the Holocene*. Moscow, pp. 32-47 (in Russian)

Leontyev O.K. 1959. On the issue of the scale and age of the Novo-Caspian transgression. *Trudy okeanograph. kom.* [Proceedings of the Oceanographic commission]. T. 4: 81-90 (in Russian)

Svitoch A.A. 2014. *Great Caspian Sea: structure and history of development*. Moscow: Moscow University Publishing House (in Russian)

Varushchenko S.I., Varushchenko A.N., Kliege R.K. 1987. *Changes in the regime of the Caspian Sea and endorheic reservoirs in paleotime*. Moscow: Science (in Russian)

Влияние колебаний уровня Каспия и динамики русловой сети дельты Волги на расположение и развитие хазарских поселений Семибугоринского археологического комплекса



Матлахова Е.Ю.^{1*}, Макшаев Р.Р.¹, Лобачева Д.М.¹, Лысенко Е.И.¹, Ткач А.А.¹, Ткач Н.Т.², Котеньков С.А.³, Соловьев Д.С.⁴

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

² МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, 36, Москва, 117997, Россия

⁴ ООО «Археоцентр», пл. Ленина, 2, Астрахань, 414000, Россия

АННОТАЦИЯ. Результаты проведенных комплексных исследований в центральной части дельты Волги в районе Семибугоринского археологического комплекса позволяют реконструировать влияние колебаний уровня Каспия и динамики русловой сети в VI-X вв. на развитие хазарских поселений. В период подъема уровня Каспийского моря (-24 м абс.) часть населения, предположительно, осваивала бэровские бугры, становившиеся в то время островами. Дельта р. Волги располагалась выше, что могло способствовать переселению основной части населения в ее северную периферию.

Ключевые слова: Палеогеография дельты Волги, колебания уровня Каспийского моря, динамика русловой сети, природные условия существования хазарских поселений

Для цитирования: Матлахова Е.Ю., Макшаев Р.Р., Лобачева Д.М., Лысенко Е.И., Ткач А.А., Ткач Н.Т., Котеньков С.А., Соловьев Д.С. Влияние колебаний уровня Каспия и динамики русловой сети дельты Волги на расположение и развитие хазарских поселений Семибугоринского археологического комплекса // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 510-515. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-510](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-510)

1. Введение

Динамика природной среды дельты Волги, определявшая условия существования человеческих поселений, тесно связана с колебаниями уровня Каспийского моря. За последние 2 тысячелетия береговые линии Каспия испытывали неоднократные изменения в пределах от -34 до -20 м абс. высоты (Леонтьев, 1959; Гумилев, 1980; Варущенко и др., 1987; Свиточ, 2014). Эти колебания приводили к изменениям палеогеографических обстановок, очертаний русловой сети и условий существования древних государств и поселений на этой территории.

2. Район работ и методы исследования

Коллективом авторов в течение нескольких лет проводились полевые работы совместно с сотрудниками археологической экспедиции ООО

«Археоцентр» и Каспийского филиала института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по изучению поселений эпохи Хазарского каганата на территории Семибугоринского археологического комплекса (Астраханская область). Культурные слои с находками красно- и сероглиняной керамики, аналогичной салтово-маяцкой культуре, относятся к VI-X вв. Параллельно с работой археологов нашим коллективом проводилось комплексное литологическое изучение шурфов и археологических раскопов, бурение и описание скважин, отбор образцов на различные виды анализов и лабораторная обработка полученных материалов (литологический, геохимический, микрофаунистический и др. анализы) для реконструкции природных условий существования хазарских поселений. Буровые скважины закладывались как на поверхности бэровских бугров, так и в межбугровых понижениях, в пределах древних протоков и ильменей, очертания которых иногда прослеживаются на аэроснимках. Помимо

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: matlakhova.k@mail.ru (Е.Ю. Матлахова)

Поступила: 03 июня 2024; **Принята:** 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



дешифрирования аэроснимков проводился анализ старинных карт для оценки более поздних изменений русловой сети территории.

3. Результаты и выводы

Комплексное изучение разрезов и пробуренных скважин, а также рельефа территории позволило реконструировать условия существования хазарских поселений в изучаемом районе. На данный момент подробно было обследовано три ключевых участка раннесредневековых поселений: Семибугры-1 (на правом берегу р. Болды, в 2 км к востоку от с. Семибугры), Бараний Бугор (на левом берегу р. Болды в пределах одноименного села и его окрестностях) и Керакле-Тобе (~ в 8 км к северу от с. Бараний Бугор).

Раскопы Семибугры-1 и Керакле-Тобе расположены на бэровских буграх. Первый расположен на склоне бугра (~ -23 - -24 м абс.), второй – на его вершинной поверхности (~ -16 м абс.). В окружающих их межбугровых понижениях вскрываются гидроморфные почвы, суглинки, супеси и пески с пресноводными (*Unio sp.*, *Dreissena polymorpha*) и солоноватоводными (*Didacna barbotdemarnii*) раковинами моллюсков. Это осадки ильменей, дельтовых протоков, ингрессионных заливов. Можно предположить, что на буграх люди селились чтобы избежать подтопления, которое могло быть связано как с подъемом уровня Каспия, так и с изменением положения волжских протоков. Также близость поселений к воде и, вероятно, их расположение на островах, подтверждается археологическими находками. Так, например, на участке Семибугры-1 встречаются находки, свидетельствующие о наличии большого рыбного промысла (большое количество рыбных костей и др.) в пределах поселения, а также прослойки окатанной керамики, свидетельствующие о подъеме уровня моря, предположительно, во второй половине X века.

Раскоп Бараний Бугор (ББ5) расположен на более низком гипсометрическом уровне (~ -25 м абс.), в пределах аллювиальной равнины на левом берегу реки Болды. В настоящее время поверхность, на которой расположен раскоп, а также само село Бараний Бугор, представляет собой незатапливаемое повышение, на несколько метров возвышающееся над окружающими пространствами. Строение раскопа ББ5 представлено чередованием культурных слоев, состоящих из темно-серых суглинков и светло-бежевых супесей и суглинков с включениями обломков и целых раковин моллюсков *Unio sp.*, *Viviparus sp.*, углистыми прослоями, костями животных, а также фрагментами красно- и сероглиняной керамики IX-X вв. В раскопе вскрываются, предположительно, остатки стены из сырцового кирпича, проходящей через весь раскоп и уходящей за его пределы, что позволяет предполагать существование здесь городского поселения. В одной из стенок раскопа (со стороны современного русла Болды) прослеживаются горизонты светло-бежевых суглинков (мощностью до 50-60 см), вероятно, представ-

ляющих собой систему валов, предназначенных для защиты поселения от паводков. Остатки валов перекрываются культурными слоями, в которых встречаются обломки керамики IX-X вв., кости животных и *in-situ* раковины моллюсков *Dreissena rostriformis*, *Unio sp.*, указывающие на субквальные условия их накопления.

Судя по аэроснимкам и историческим картам, к северу и северо-востоку от с. Бараний Бугор угадываются очертания древних протоков и ильменей, поверхность которых была преобразована в ходе интенсивного сельскохозяйственного освоения во второй половине XX века (рисовые чеки, в последние десятилетия заброшенные). Данные бурения и изучения шурфов в этом районе свидетельствуют о наличии суглинков, супесей и песков, иногда с раковинами моллюсков *Dreissena polymorpha* и *Unio sp.* Состав вскрытых отложений представляет собой осадки поймы, ильменей, дельтовых протоков и, возможно, ингрессионных заливов.

Исходя из анализа полученных данных и их сопоставления с археологическими находками, можно предположить, что хазарское поселение в районе раскопа Бараний Бугор (ББ5) располагалось в условиях относительно интенсивной гидродинамической обстановки. Об этом свидетельствуют находки *in-situ* раковин пресноводных и солоноватоводных моллюсков *Dreissena rostriformis*, *Viviparus sp.*, *Unio sp.*, группа пресноводных планктонных диатомей *Aulacoseira granulata* и *A. Italica*, а также характер залегания отложений, культурных слоев и древних валов в раскопе. Предположительно, вблизи поселения располагалась древняя протока, смещение которой привело к тому, что поселение было заброшено, а верхние части крепостных стен разрушены под воздействием реки.

Полученные результаты позволяют предположить, что в период существования поселений Волжской Хазарии, они неоднократно подвергались воздействию колебаний уровня Каспийского моря и перестройки русловой сети на исследуемой территории. В период существования поселений (VIII – начало X вв.) уровень Каспийского моря, предположительно, располагался на низких отметках (-30 - -33 м абс.), осваивались большие пространства в дельтовой части р. Волги. В периоды подъема уровня Каспия (VI-VII вв., вторая половина X в.), часть поселений располагалась на бэровских буграх, другие, вероятно, занимали участки в верховьях дельты Волги.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность археологической экспедиции Семибугоринского археологического комплекса за всестороннюю помощь в организации и проведении полевых работ. Исследование выполнено в рамках тем госзадания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Палеогеографические реконструкции природных геосистем и прогнозирование их изменений» (ГЗ 121051100135-0) и «Эволюция

природной среды в кайнозое, динамика рельефа, геоморфологические опасности и риски природопользования» (ГЗ 121040100323-5).

Конфликт интересов

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. 1987. Изменение режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. Москва: Наука.

Гумилев Л.Н. 1980. История колебания уровня Каспия за 2000 л. (с IV в. до н.э. по XVI в. н.э.). В книге: Андрианов Б.В., Зорин Л.В., Николаева Р.В. (ред). Колебания увлажненности Арало-Каспийского региона в голоцене. Москва, с. 32-47.

Леонтьев О.К. 1959. К вопросу о масштабах и возрасте новокаспийской трансгрессии. Труды океанограф. ком. Т. 4: 81-90.

Свиточ А.А. 2014. Большой Каспий: строение и история развития. Москва: Издательство Московского университета.

Paleoecology of peatland in the vicinity of the dune massif – Linde tukulan (Central Yakutia)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Pavlova M.R.*, Lytkin V.M., Shaposhnikov G.I.

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Merzlotnaya Str., 36, Yakutsk, 677010, Russian

ABSTRACT. Results of investigation of peatland uncovered within an ancient deflationary basin in the south-eastern part of the Linde tukulan (Central Yakutia) are presented. On the basis of lithological, palynological and radiocarbon data, we reconstruction structure of peatland, performed a preliminary reconstruction of the end Late Pleistocene – Holocene landscape and climatic conditions of the peatland and surrounding areas. Three stages of the peatland development were identified: 1) Younger Dryas – Early Holocene, 2) first half of the Holocene, 3) Late Holocene.

Keywords: peatland, tukulan, pollen analysis, radiocarbon dating, Younger Dryas, Holocene

For citation: Pavlova M.R., Lytkin V.M., Shaposhnikov G.I. Paleocology of peatland in the vicinity of the dune massif – Linde tukulan (Central Yakutia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 516-521. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-516

1. Introduction

The valley of Linde River is one the regions were Late Quaternary and modern massifs of dune sands of Yakutia are spread. One of the largest sand massifs – Linde tukulan are located in the valley of Linde River. Its area is more 3000 km². Tukulans are dunes of the higher order. Three levels of features of topography are easily seen in their structure: mesofeatures (dune chains), microfeatures (different types of dunes, deflation basins, deflation corridors), and nanofeatures (mounds, grass clusters, microdunes, “clay mushroom”, and ripples) (Pavlova et al., 2017).

Some deflation basins are water-filled. Such water bodies are called tukulan or deflation lakes. These lakes within the Linde tukulan are at different stages of development: oligotrophic, mesotrophic, some eutrophic with transition to small bogs. Currently, deflation lakes remain the least explored type of lakes in Yakutia. The deflation lakes have a small area (on average from 0.05-0.2 to 20 km²), and therefore these lakes are the most promising for climate and environmental reconstructions because their sediments record mostly local signals of the climate, vegetation and ecological changes.

At the upper part of a 40-meter-high and 1.5 km- length outcrop located in the southwestern part of Linde tukulan, in 2022 we uncovered the series of thin horizons filled with lake and swamp deposits. Such

horizons are confined to relict deflation basins. Section No. 554 (65°02.447' north latitude., 123°03.968' east longitude) is uncovered within one of deflation basins. This article presents the results investigation of peatland. On the basis of lithological, palynological and radiocarbon data, we reconstruction structure and age of peatland, also the nature of vegetation

and the conditions of peatland formation within the Linde tukulan.

2. Material and methods

The section No. 554 is uncovered in the upper part of the 40-meters outcrop tukulan. This section is allocated to left bank of the Linde River. The total deposits thickness is 5 m. The lithology of the section (from top to down):

0-0.4 m – black and dark brown humus deposits with roots of modern plants;

0.4-2 m – dark-brown moss-sedge poorly decomposed peat with inclusion of remains of the species *Ericales*, branches and trunks of woody vegetation.

2-3 m – dark brown moss-sedge decomposed peat with remains of the species *Ericales*.

3-4.5 (5) m – dark brown gleization frozen silt sandy loam.

Radiocarbon dates for 3 samples were performed by the approach of liquid scintillation on a Quantulus 1220 spectrometer – radiometer at the Laboratory

*Corresponding author.

E-mail address: Nigaer@yandex.ru (M.R. Pavlova)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



of General Geocryology of the Mel'nikov Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (the city of Yakutsk).

Deposits of the peatland were studied by pollen analysis with sample interval 40-50 cm (8 samples in total). Samples were processed using to the method of V.P. Grichuk (Grichuk and Zaklinskaya, 1948) with the acetolysis procedure at the final stage. Samples were subsequently examined under the microscope with 400x magnification. The diagram of pollen percentage and pollen concentration diagram were constructed using the Tilia_2.0.41 (Grimm, 2004). In the diagram of pollen percentage, the percentage values of all taxa were calculated in the ratio to arboreal pollen + non-arboreal pollen (AP + NAP) sum.

3. Results

Radiocarbon data were obtained for 3 samples from depths of 0.5, 1.5 and 3 meters, which corresponds to the dates MPI-255 – 4860 ± 260, MPI-235 – 5650 ± 140 and MPI-224 – 12040 ± 490 calendar years ago.

Characteristic of palynozones of sections 554 on the peatland, Linde tukulan (Fig. 1).

1 – silt sandy loam, 2 – peat, 3 – humus deposits, 4 – roots of modern plants, 5 – tree branches and trunks, 6 – remains of the species *Ericales* 7 – gleization, 8 – cryogenic deposits. * AP – arboreal pollen, NAP – non-arboreal pollen.

Polynozone PZI (4-2.8 m) is characterized by the predomination NPA (to 70.7%). Among them, Poaceae (26.5-51.7%), Cyperaceae (to 13.6 %) and *Artemisia* (to 12.6%) prevails. AP comprises 23.9-44.9% and is predominated by the species *Betula sec. Nanae* (16.8-39.6 %). There is a small amount of pollen of other trees:

Larix (2.8-5.1%), *Alnus* (1.1-5.1%) и *Salix* (0.6-2.3%). Spores comprise 1.3-5.5% and the participation of the species *Bryidae* and *Equisetum*.

Polynozone PZII (2.8-0.5 m) is distinguished by a decreased in the content of AP (57.3-79.5%) and a rise in the content of NAP (18.2-38.9 %) in comparison with polynozone PZI. Two subzones are distinguished within the palynozone PZII. The first subzone (PZIIa, 2.8-1.8 m) is characterized by the predomination species *Betula sec. Nanae* (48.2-61.8%) and *Larix* (3.6-3.7%). In the specters is a pollen of other trees: *Pinus s/g Haploxyylon*, *Picea*, *Alnus* and *Salix*. NPA comprises from 26.7 to 38.9% and is predominated by the families Poaceae (14.8-16.2%) and Cyperaceae (7.3-18.4%). Spores comprise 1.6-3.8%. In the specters is spores: *Selaginella rupestris*, Polypodiophyta, *Sphagnum*, *Riccia*, *Bryidae*, *Equisetum*, *Lycopodium pungens*.

The second subzone (PZIIb, 1.8-0.5 m) is distinguished by a decreased in the content of pollen *Betula sec. Nanae* (13.5-20.5%), *Larix* (1.5-1.8%), Cyperaceae (6.3-9.2%) and Poaceae (5.2-10.1%), and a sharp rise in the content of pollen *Pinus s/g Haploxyylon* (51.2-55.7 %) and *Ericales* (0.6-0.9%) in comparison with subzone PZIIa. In addition, in this subzone there is a decreased in the diversity of herbs (only the species *Artemisia*, the families Rosaceae and Ranunculaceae) and absence of spores *Selaginella rupestris*.

Polynozone PZIII (0.5-0 m) is characterized by the predomination AP (to 52.6%). Among them, *Pinus s/g Haploxyylon* (to 20.5%) and *Betula sec. Nanae* (to 23%) prevails. Also, in the specters is a many amount of spores of the *Spagnum* (to 27.9%). In the specters is a pollen of other trees: *Larix*, *Picea*, *Betula sec. Albae*, *Alnus* and *Salix*. NAP comprises to 17.7% and is predominated by the families Cyperaceae (to 6.6%), Poaceae (to 5.3%), Rosaceae (to 2.3%) and the species

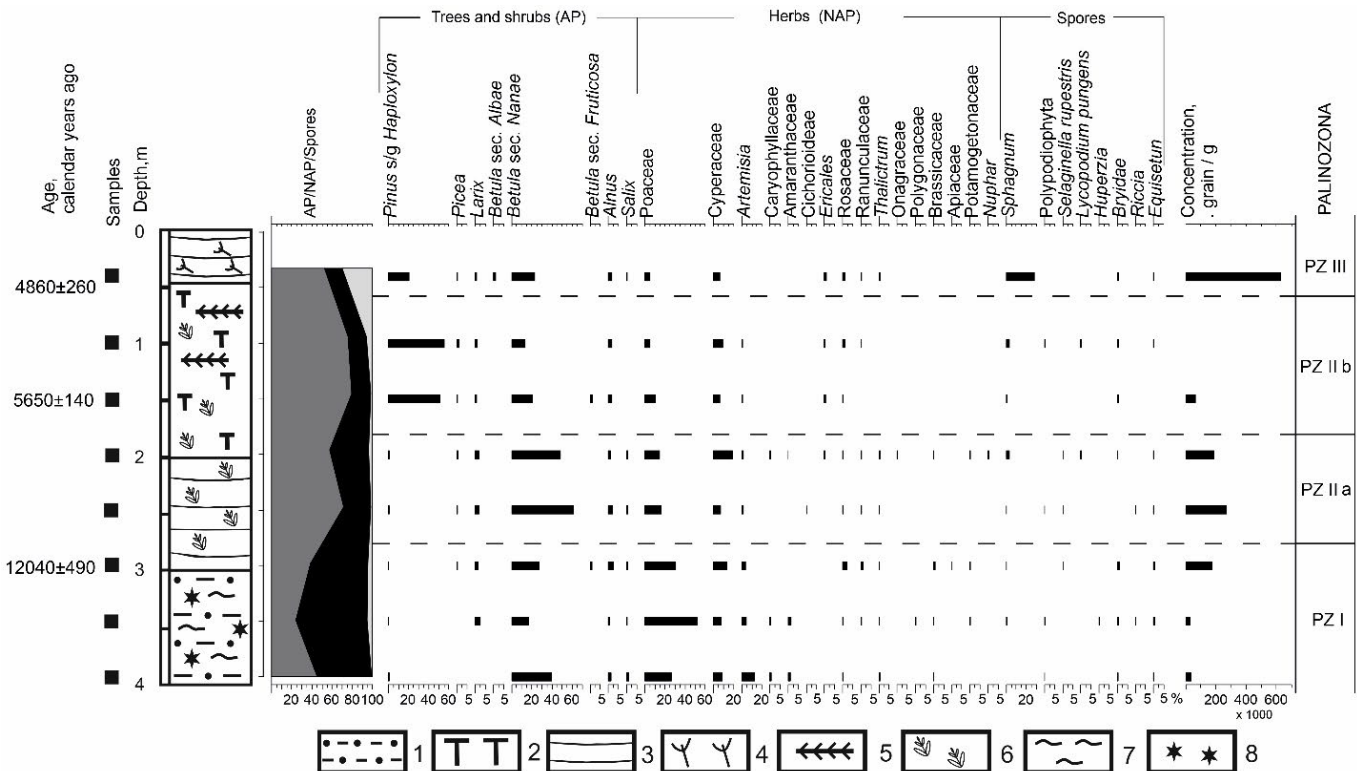


Fig.1. Geological structure and pollen diagram of deposits (0 to 4 m-thick layer) in section 554 on peatland, Linde tukulan (Central Yakutia).

Ericales (to 2.1%).

4. Discussion and conclusions

The formation of the peatland, which was uncovered within an ancient deflationary basin in the southwestern part of the Linde tukulan, presumably began peatland is uncovered within the ancient deflationary basin in southwestern part of Linde tukulan, began to formation, presumably, at the end of the Late Pleistocene (Younger Dryas) – the beginning of the Holocene. At this time the climate was quite arid and cold. The surrounding landscapes had relatively poor vegetation cover. According to the data of this investigation (Fig. 1, PZI), at this time open-type landscapes prevailed, predominantly, sandy spaces with sparse vegetation cover and dry areas of cold steppes with the dominance of xerophytic communities (*Artemisia*, *Amaranthaceae*, *Caryophyllaceae*, etc.). Also, in some places grass-forb meadows were widespread. More humid areas or small deflationary lakes were overgrown with pondweed, sedges, and aquatic species of buttercups, surrounded by dwarf species of willows and birches. In some places, larch woodlands and birch thickets of dwarf birch and alder grove were developed.

During the first half of the Holocene there was an increase in moisture content and climate softening. The vegetation was probably similar to sparse larch forests. Shrub species of birch and alder formed tundra and forest communities. In some places, forb-grass associations and lakes were developed, the banks of which were overgrown with pondweed and sedge (Fig. 1, PZIIa). Later, a successional change occurred and the predominant role in the landscape is played by larch forests with undergrowth of *Pinus pumila*, shrubby spe-

cies of birch and alder grove (Fig. 1, PZII b).

The landscapes acquired a modern character in the late Holocene. The vegetation cover was predominated by larch-lichen-green moss forest with undergrowth of *Pinus pumila*, dwarf species of birch and alder grow. (Fig. 1, PZIII).

5. Acknowledgement

The study was supported by research project no. 122011800064-9 “Structure and Key Steps in Evolution of the Continental Cryolithozone in the Neopleistocene and Holocene”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

References

- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analiz iskopaemykh pyl'tsy i spor i yego primeneniye v paleogeografii [Analysis of fossil pollen and spores and its application in palaeogeography]. Moscow: OGIZ. (in Russian)
- Grimm E. 2004. Tilia software 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collection Center, Springfield.
- Pavlova M.R., Rudaya N.A., Galanin A.A. et al. 2017. Structure and evolution of dune massifs in the Vilyui river basin over the Late Quaternary period (by the example of the Makhatta and Kysyl-Syr Tukulan). Contemporary problem of ecology, 2017, vol. 10, No. 4: 411–422. DOI: [10.1134/S1995425517040072](https://doi.org/10.1134/S1995425517040072)

Палеоэкология торфяника в окрестностях дюнного массива – тукулан Линде (Центральная Якутия)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Павлова М.Р.* , Лыткин В.М., Шапошников Г.И.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная д. 36, Якутск, 677010, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты исследования торфяника, вскрытого в пределах древней дефляционной котловины в юго-восточной части тукулана Линде (Центральная Якутия). На основе литологических, спорово-пыльцевых и радиоуглеродных данных установлено его строение, выполнена предварительная реконструкция позднеплейстоценового-голоценового ландшафта и климатических условий формирования торфяника и прилегающих территорий. Выделено три этапа развития торфяника: 1) поздний дриас – ранний голоцен; 2) первая половина голоцена, 3) поздний голоцен.

Ключевые слова: торфяник, тукулан, палинологический анализ, радиоуглеродное датирование, поздний дриас, голоцен

Для цитирования: Павлова М.Р., Лыткин В.М., Шапошников Г.И. Палеоэкология торфяника в окрестностях дюнного массива – тукулан Линде (Центральная Якутия) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 516-521. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-516

1. Введение

Долина р. Линде является одним из крупных районов распространения позднечетвертичных и современных дюнных массивов в Якутии. Здесь расположен один из крупнейших песчаных массивов – тукулан Линде, площадь которого составляет более 3000 км². Тукуланы являются дюнами высшего порядка в строении которых выделяются несколько уровней: мезорельеф (цепочки дюн), микрорельеф (различные типы дюн, котловины выдувания, коридоры выдувания), микрорельеф (кочки, бугры, микродюны, «глинистые грибы», рябь течения) (Павлова и др., 2017).

Некоторые котловины выдувания заполнены водой. Такие водоемы называют дефляционными озерами. Эти озера в пределах тукулана Линде находятся на разных стадиях развития: олиготрофной, мезотрофной, часть на эвтрофной с переходом в небольшие болотца. В настоящее время дефляционные озера остаются наименее изученным типом озер Якутии. Они имеют небольшую площадь (в среднем от 0.05-0.2 до 20 км²) и поэтому являются наиболее перспективными для реконструкций климата и окружающей среды, поскольку в донных отложениях фиксируются, преимущественно, локальные сигналы климатических, растительных и экологических изменений.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: Nigaer@yandex.ru (М.Р. Павлова)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

В 2022 г. в юго-западной части тукулана Линде в верхней части 40-метрового обрыва, протягивающегося на 1.5 км, вскрыта серия небольших по мощности горизонтов, заполненные озерными и болотными отложениями. Такие участки приурочены к реликтовым дефляционным котловинам. В пределах одной из котловин заложен разрез № 554 (65°02.447' с. ш., 123°03.968' в. д.). В данной работе представлены данные литологических, палинологических и радиоуглеродных исследований отложений, на основе которых выполнена предварительная реконструкция строения, возраста, состава растительности и условия формирования торфяника в пределах тукулана Линде.

2. Материалы и методы

Вскрытый торфяник (разрез № 554) в верхней части 40-метрового обрыва тукулана на левом берегу р. Линде и имеет мощность 5 м. Он имеет следующее строение (сверху-вниз):

0-0.4 м – черные и темно-коричневые гумусовые отложения с растительным детритом и корешками современных растений;

0.4-2 м – темно-коричневый мохово-осоковый слаборазложившийся торф с включениями остатков вида *Ericales*, ветвей и стволов древесной растительности;

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2-3 м – темно-коричневый мохово-осоковый разложившийся торф с остатками вида *Ericales*.

3-4.5(5) м – темно-коричневая оглеенная супесь пылеватая, мерзлая.

Радиоуглеродное датирование трех образцов выполнено методом жидкостной сцинтилляции на спектрометре-радиометре Quantulus 1220 в Лаборатории общей геохронологии Института мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (г. Якутск).

Для отложений торфяника выполнен палинологический анализ с интервалом отбора проб через 40-50 см (8 проб). Образцы обрабатывали по методу В.П. Гричука (Гричук и Заклинская, 1948) с процедурой ацетализа на завершающем этапе. Затем образцы исследовались под микроскопом с 400-кратным увеличением. Диаграммы процентного содержания пыльцы и концентрации пыльцы построены с помощью программы Tilia 2.0.41 (Grimm, 2004). На диаграмме процентные значения всех таксонов рассчитывали в соотношении древесная пыльца + недревесная пыльца (AP + NAP).

3. Результаты

Радиоуглеродные даты получены для трех образцов с глубин 0.5, 1.5 и 3 метров, что соответствует датам MPI-255 – 4860 ± 260, MPI-235 – 5650 ± 140 и MPI-224 – 12040 ± 490 календарных лет назад.

Характеристика палинозон разреза торфяника № 554, тукулан Линде (рис. 1).

1 – супесь легкая пылеватая, 2 – торф, 3 – гумусовые отложения, 4 – корешки современных растений, 5 – ветки и стволы деревьев, 6 – остатки

Ericales, 7 – оглеение, 8 – мёрзлые отложения * AP – древесная пыльца, NAP – недревесная пыльца.

Палинозона PZI (4-2.8 м) характеризуется доминированием NPA (до 70.7%). Среди них преобладают Poaceae (26.5-51.7%), Cyperaceae (до 13.6%) и *Artemisia* (до 12.6%). AP составляет 23.9-44.9% с преобладанием *Betula sec. Nanae* (16.8-39.6%). В небольшом количестве отмечается пыльца других деревьев: *Larix*, *Alnus* и *Salix*. Споры составляют 1.3-5.5% с преобладанием *Bryidae* и *Equisetum*.

Палинозона PZII (2.8-0.5 м) отличается снижением содержания AP (57.3-79.5%) и повышением NAP (18.2-38.9%) по сравнению с палинозоной PZI. В пределах палинозоны PZII выделяются две подзоны. Первая подзона (PZIIa, 2.8-1.8 м) характеризуется доминированием *Betula sec. Nanae* (48.2-61.8%) и *Larix* (3.6-3.7%). В спектрах присутствует пыльца других деревьев: *Pinus s/g Haploxyton*, *Picea*, *Alnus* и *Salix*. NPA составляют от 26.7 до 38.9% с преобладанием Poaceae (14.8-16.2%) and Cyperaceae (7.3-18.4%). Споры составляют 1.6-3.8%. Отмечаются споры *Selaginella rupestris*, Polypodiophyta, *Sphagnum*, *Riccia*, *Bryidae*, *Equisetum*, *Lycopodium pungens*.

Вторая подзона (PZIIb, 1.8-0.5 м) отличается снижением пыльцы *Betula sec. Nanae* (13.5-20.5%), *Larix* (1.5-1.8%), Cyperaceae (6.3-9.2%) и Poaceae (5.2-10.1%), а также резким ростом содержания *Pinus s/g Haploxyton* (51.2-55.7%) и *Ericales* (0.6-0.9%) по сравнению с подзоной PZIIa. Кроме того, в этой подзоне наблюдается снижение разнообразие трав (только *Artemisia*, Rosaceae и Ranunculaceae) и отсутствие спор *Selaginella rupestris*.

Палинозона PZIII (0.5-0 м) характеризуется преобладанием AP (до 52.6%) с доминированием пыльцы *Pinus s/g Haploxyton* (до 20.5%) и *Betula*

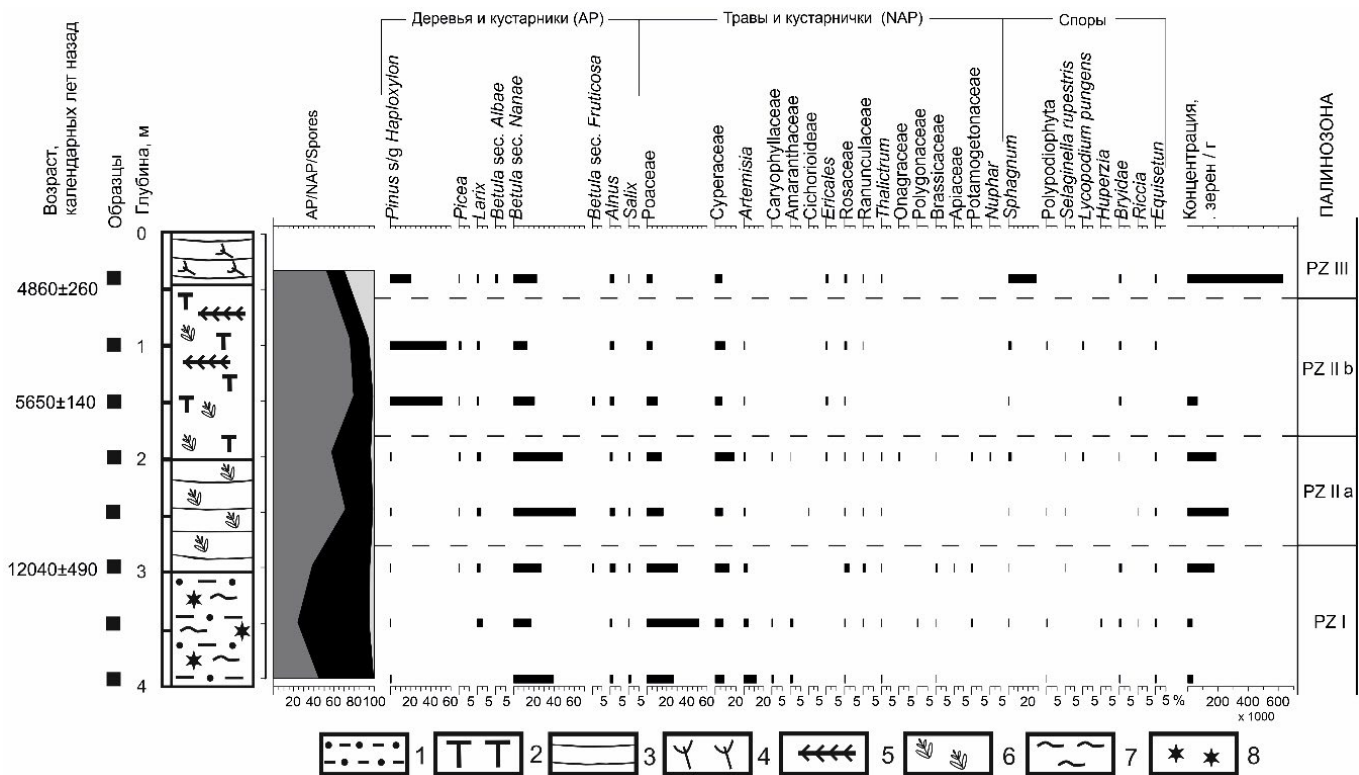


Рис.1. Геологическое строение и палинологическая диаграмма отложений торфяника (разрез № 554) в интервале 0-4 м, тукулан Линде (Центральная Якутия)

sec. *Nanae* (to 23%). Также много спор *Sphagnum* (до 27.9%). В спектрах присутствует пыльца других деревьев: *Larix*, *Picea*, *Betula* sec. *Albae*, *Alnus* и *Salix*. NAP составляет до 17.7% с преобладанием *Cyperaceae* (до 6.6%), *Poaceae* (до 5.3%), *Rosaceae* (до 2.3%) и *Ericales* (до 2.1%).

4. Обсуждение и выводы

Формирования торфяника, вскрытого в пределах древней дефляционной котловины в юго-западной части тукулана Линде, началось, предположительно, в конце позднего плейстоцена (поздний дриас) – начале голоцена. В это время климат был достаточно сухим и холодным. Окружающие ландшафты имели относительно бедный растительный покров. Согласно полученным данным (рис. 1, PZI), в это время преобладали ландшафты открытого типа, преимущественно, песчаные пространства с разреженным растительным покровом и сухие участки холодных степей с доминированием ксерофитных сообществ (*Artemisia*, *Amaranthaceae*, *Caryophyllaceae* и др.), местами были распространены злаково-разнотравные луга. К более увлажнённым участкам и небольшим дефляционным озерам было приурочено зарастание рдестом, осоковыми, водными видами лютиковых, окруженные карликовыми видами ив и берез. Местами были развиты лиственничные редколесья и ерниковые заросли из карликовых видов берез и ольховника.

На протяжении первой половины голоцена происходит увеличение увлажнения и смягчения климата. Растительность, вероятно, была подобна редкостойным лиственничным лесам. Кустарниковые виды берез и ольховник формировали тундровые и лесные сообщества, местами были развиты разнотравно-злаковые ассоциации и

озера, берега которых зарастали рдестовыми и осоковыми (рис. 1, PZIIa). Позже происходит сукцессионная смена и в ландшафте преобладающую роль играют лиственничные леса с подростом кедрового стланика, кустарниковых видов берез и ольховника (рис. 1, PZIIb).

В позднем голоцене ландшафты приобретают современный характер и в растительном покрове доминирует лиственнично-лишайниково-зеленомошный лес с подростом из *Pinus pumila*, карликовых видов берез и ольховника (рис. 1, PZIII).

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке проекта №. 122011800064-9 «Строение и основные этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене».

Конфликт интересов

У авторов нет никаких конфликтов интересов

Список литературы

- Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемой пыльцы и спор, и его применение в палеогеографии. Москва: ОГИЗ.
- Grimm E. 2004. Tilia software 2.0.2. Illinois State Museum Research and Collection Center, Springfield.
- Павлова М.Р., Рудая Н.А., Галанин А.А. и др. 2017. Строение и динамика развития дюнных массивов Вилюйского бассейна в позднечетвертичное время (на примере тукуланов Махатта и Кысыл-Сыр). Сибирский экологический журнал, № 4: 473-486. DOI: [10.15372/SEJ20170408](https://doi.org/10.15372/SEJ20170408)

On the question of Coniferous Island expansion in the north of the Central Kamchatka Depression during the Holocene

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYMukhametshina E.O.^{1,2*}, Shchekleina M.D.³¹Institute of Geography, RAS, Moscow, Staromonetny lane, 29, bld. 4, 119017, Russia²Geological Institute RAS, Moscow, Pyzhevsky lane 7, bld. 1, 119017, Russia³Fersman Mineralogical Museum, Moscow, Leninsky avenue, 18, bld. 2, 119071, Russia

ABSTRACT. Despite the long history of studying the conifers dispersal in the Central Kamchatka Depression during the Holocene, the understanding of vegetation dynamics in the northern part of the depression is much weaker due to the lack of palynological sections. Pollen analysis of a peat section located to the southwestern of Shiveluch volcano allowed an assessment of the “Coniferous Island’s” expansion dynamics in the northern part of the Central Kamchatka Depression. According to the data obtained, the expansion of larch forests in this area began about 700 cal. yrs. BP, i.e. 100-150 yrs. later than in the southern part of the depression. Spruce, which replaces larch during succession, began to spread here about 400 cal. yrs. BP, as in the rest of the depression.

Keywords: Kamchatka, pollen analysis, Late Holocene

For citation: Mukhametshina E.O., Shchekleina M.D. On the question of Coniferous Island expansion in the north of the Central Kamchatka Depression during the Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 522-527. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-522

1. Introduction

The question of Holocene vegetation changes in Kamchatka, especially in the Central Kamchatka Depression (CKD), has long been of interest to researchers (Braitseva et al., 1968; Skiba, 1975; Khotinsky, 1977, etc.). Due to the more favourable climatic conditions of the CKD compared to the coastal areas of the Peninsula, a so-called “Coniferous Island” with forests of larch (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) and spruce (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carriere) spread in the depression. The restoration and expansion of these coniferous forests after their almost complete disappearance during the Late Pleistocene glaciation is of particular interest to researchers (Braitseva et al., 1968). It is considered that during glaciations, biological refugia supported populations of larch and spruce in the CKD (Braitseva et al., 1968), and during interglacial periods, including the Holocene, they could expand. Throughout most of the Holocene, deciduous species dominated the forest composition of the CKD, but after 1700 cal. yrs. BP there was a gradual expansion of larch and spruce forests (Dirksen et al., 2013).

The northern part of the CKD is less studied due to difficulties in finding good sections for pollen analy-

sis. The aim of our work was to study changes in pollen concentration of conifers in the sediments of a peat core located to the south-west of Shiveluch volcano, in order to assess the dynamics of the boundaries of the Conifer Island in the northern part of the CKD. The study will help to clarify the Late Holocene history of vegetation change in this area.

2. Materials and methods

The core Kich is located 17 km north-east of the village Kluchi in a long depression between the Shiveluch and Kharchinsky volcanoes. From the south, the depression is blocked by a moraine of a glacier that advanced from the slope of Shiveluch volcano in the CKD during the last glaciation (Zelenin et al., 2023). The depression is drained by the Kich River, from which the core takes its name. The core shows peaty loam (5.15-5.03 m) and peat (5.03-0.15 m) with numerous layers of ash. Based on tephrochronological and radiocarbon dating, these sediments were accumulating over a period of about 3000 years, corresponding to an average accumulation rate of about 0.14 cm/year.

Samples for pollen analysis were prepared

*Corresponding author.

E-mail address: eomukhametshina@gmail.com (E.O. Mukhametshina)

Received: June 07, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



according to the separation technique of V.P. Grichuk (Grichuk and Zaklinskaya, 1948) using HPS-W heavy liquid. Acetolysis was performed with propionic anhydride (Mazei and Novenko, 2021). When calculating the percentages of pollen taxa, the sum of pollen from terrestrial plants was taken as the base. A tablet containing a known number of *Lycopodium* spores was added to each sample to determine the concentration of pollen in the sediments (Stockmarr, 1971) and to calculate pollen accumulation rates (PAR).

3. Results and Discussion

Pollen analysis of peaty loam and peat from the Kich core showed that the larch pollen content was very low up to 700 cal. yrs. BP. (<1%), and after that it increased, reaching 0.3-3.5%. The low content of larch pollen in sediments is primarily connected to poor preservation during fossilization; therefore, such increase in the proportion of *Larix* pollen reflects the expansion of the larch forests.

Percentage of spruce pollen increases after 400 cal. yrs. BP from less than 2.7% to 2.4-6.1%. The proportion of larch and then spruce pollen in the pollen assemblages increases due to successional changes that are currently developing in normally drained habitats of Central Kamchatka (Neshataeva, 2009).

Pollen concentration is determined for each species individually and does not depend on the amount of other taxa pollen in the same sample, which makes it possible to trace changes across the section even for plants with low pollen productivity (Borisova, 2011). The pollen concentrations of conifers pollen in the studied sediments as well as proportion in pollen assemblages remain low throughout the section. However, while the proportions of *Larix* and *Picea* pollen increase in the upper part of the core, the concentration of spruce pollen remains virtually unchanged throughout the study period, and the concentration of larch pollen even decreases. These changes in concentrations are explained by a natural decrease in peat density in the upper part of the section.

To avoid the influence of this “increase” in the sediment accumulation rate over time, the pollen accumulation rates (PAR) can be calculated. This technique takes into account changes in the sedimentation rate (Borisova, 2011). The PAR values for larch are high between 2250-1650 cal. yrs. BP., then decreased and increased again after 700 cal. yrs. BP. The PAR values for spruce remained relatively low until 400 cal. yrs. BP. and then increased. Thus, the amount of pollen from these coniferous trees deposited on the soil surface increased after 700 cal. yrs. BP. This likely reflects both a rise in their pollen production and their expanding presence in local forest communities due to more favourable climatic conditions.

Analysis of published data on the Holocene vegetation and climate history of Kamchatka indicates that landscape and climate changes occurred asynchronously across the peninsula (Dirksen et al., 2013). Studies of sections in the southern CKD show the presence of coniferous pollen in sediments through-

out the Holocene, with a significant increase after 840 cal. yrs. BP (Braitseva et al., 1968; Dirksen et al., 2013). The Coniferous Island in the southern part of the depression reached its maximum extent around 450-320 cal. yrs. BP (Dirksen et al., 2013).

Our data suggest that larch forests in the northern CKD began to spread about 100-150 years later than in the southern parts of the depression. This may indicate that larch refugia were primarily located in the south, leading to an earlier spread of larch forests there once favourable conditions emerged. Meanwhile, spruce, which succeeds larch, began to expand its range across the entire Central Kamchatka Depression after 400 cal. yrs. BP.

4. Conclusions

Thus, our study confirms the expansion of the Conifer Island in the CKD at the end of the Holocene, which occurred about 100-150 years later in the north of the depression than in the south. This difference may be explained by the more southerly location of glacial conifer refugia.

Acknowledgements

The Authors express their gratitude to O.K. Borisova for her valuable comments and guidance at all stages of work, as well as to A.L. Zakharov and D.D. Vorontsov for their assistance in collecting field data.

Field work was carried out with the support of the Megagrant “Palaeoecological reconstructions as the key to understanding past, current, and future climate and environmental changes in Russia” (agreement no. 075-15-2021-599, August 6, 2021). Laboratory work was made with support of the Russian Science Foundation grant no. 21-77-10102. Palynological studies were carried out within the framework of the state assignment to the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences (FMWS-2024-0005).

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Borisova O.K. 2011. Interpretation of palynological data with the concentration and pollen accumulation rate. In: Problems of modern palynology. Materials of the XIII Russian palynological conference with international participation, pp. 85-89.
- Braitseva O.A., Melekescev I.V., Evteeva I.S. et al. 1968. Stratigraphy of Quaternary deposits and glaciation of Kamchatka. Moscow: Nauka. (In Russian)
- Dirksen V., Dirksen O., Diekmann B. 2013. Holocene vegetation dynamics and climate change in Kamchatka Peninsula, Russian Far East. Review of Palaeobotany and Palynology. 190: 48-65. DOI: [10.1016/j.revpalbo.2012.11.010](https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.11.010)
- Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application to paleogeography. Moscow: OGIZ, GEOGRAFGIZ. (In Russian)
- Khotinsky N.A. 1977. Holocene of Northern Eurasia:

experience of transcontinental correlation of stages of development of vegetation and climate. Moscow.: Nauka. (In Russian)

Mazei N.G., Novenko E.Yu. 2021. The use of propionic anhydride in the sample preparation for pollen analysis. *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka.* 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Neshataeva V.YU. 2009. *Vegetation of the Kamchatka Peninsula.* Moscow: KMK. (In Russian)

Skiba L.A. 1975. *History of the development of vegetation in Kamchatka in the late Cenozoic.* Moscow: Nauka. (In Russian)

Stockmarr J. 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et spores.* 13: 614-621.

Zelenin E., Gurinov A., Garipova S., Zakharov A. 2023. Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific. *Journal of Maps.* 19(1): 2252006. DOI: [10.1080/17445647.2023.2252006](https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006)

К вопросу о расширении «хвойного острова» на севере Центральной Камчатской депрессии в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYМухаметшина Е.О.^{1,2*}, Щеклеина М.Д.³¹Институт географии, Российская академия наук, Москва, Старомонетный переулок, 29, стр. 4, 119017, Россия²Геологический институт РАН, Москва, Пыжевский пер, 7, стр.1, 119017, Россия³Минералогический Музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Ленинский проспект, 18, корп. 2, 119071, Россия

АННОТАЦИЯ. Несмотря на многолетнюю историю изучения распространения хвойных пород деревьев в Центральной Камчатской депрессии в голоцене, изученность динамики растительности в северной части депрессии значительно слабее из-за отсутствия разрезов, подходящих для палинологического исследования. Спорово-пыльцевой анализ разреза торфяника, расположенного у юго-западного подножия вулкана Шивелуч, позволил оценить динамику расширения «хвойного острова» в северной части Центральной Камчатской депрессии. Согласно полученным данным, экспансия лиственничников в этом районе началась примерно 700 кал. л. н., что на 100-150 лет позже, чем в южной части депрессии. Ель, в ходе сукцессии сменяющая лиственницу в качестве основной лесобразующей породы, стала распространяться здесь около 400 кал. л. н., как и в остальной части депрессии.

Ключевые слова: Камчатка, спорово-пыльцевой анализ, поздний голоцен

Для цитирования: Мухаметшина Е.О., Щеклеина М.Д. К вопросу о расширении «хвойного острова» на севере Центральной Камчатской депрессии в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 522-527. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-522

1. Введение

Вопрос голоценового изменения растительности Камчатки, в частности Центральной Камчатской депрессии (далее – ЦКД), давно интересует исследователей (Брайцева и др., 1968; Скиба, 1975; Хотинский, 1977 и др.). Благодаря более благоприятным климатическим условиям ЦКД в сравнении с прибрежными районами полуострова в днище депрессии расположен так называемый «хвойный остров» из лесов с участием лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.) и ели аянской (*Picea jezoensis* (Siebold & Zucc.) Carrière). Особое внимание исследователей привлекает восстановление и экспансия этих хвойных лесов после их почти полного исчезновения во время позднеплейстоценового оледенения (Брайцева и др., 1968). Считается, что во время оледенений популяции хвойных деревьев сохранялись в небольших рефугиумах в ЦКД (Брайцева и др., 1968), а в межледниковые этапы, в том числе в голоцене, их ареалы восстанавливались и расширялись. На протяжении большей части голоцена в составе лесов в ЦКД господствовали

лиственные породы, но после 1700 кал. л. н. происходила постепенная экспансия лиственничников и ельников (Dirksen et al., 2013).

Северная часть ЦКД относительно слабо изучена с точки зрения изменения состава растительности в течение голоцена из-за трудностей с поиском подходящих для спорово-пыльцевого анализа разрезов. Целью нашей работы было проследить изменения содержания пыльцы хвойных пород деревьев в отложениях торфяника, расположенного у юго-западного подножия вулкана Шивелуч, для оценки динамики границ «хвойного острова» в северной части ЦКД. Проведенные исследования позволяют уточнить позднеголоценовую историю изменений растительности в этом районе.

2. Материалы и методы

Скважина Кич была заложена в 17 км к северо-востоку от пос. Ключи в удлиненной межгорной впадине между вулканами Шивелуч и Харчинский. С юга впадина перегорожена холмисто-западинной мореной ледника, выдвигавшегося со склона вул-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: eomukhametshina@gmail.com (Е.О. Мухаметшина)

Поступила: 07 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



кана Шивелуч в ЦКД во время последнего оледенения (Zelenin et al., 2023). Впадина дренируется рекой Кич, по которой скважина получила свое название. В керне вскрываются оторфованный суглинок (5,15-5,03 м) и торф (5,03-0,15 м) с многочисленными прослоями пеплов. На основе тефрохронологического и радиоуглеродного анализов удалось установить, что эти осадки образовались приблизительно в течение 3000 лет, что соответствует средней скорости накопления около 0,14 см/год.

Подготовка образцов на пыльцевой анализ проведена по сепарационной методике В.П. Гричука (Гричук и Заклинская, 1948) с использованием тяжелой жидкости ГПС-В. Ацетализ проводился с пропионовым ангидридом (Мазей и Новенко, 2021). При расчете процентных соотношений пыльцевых таксонов за базовую сумму принималась сумма пыльцы наземных растений. В каждый образец было добавлено по одной таблетке с известным количеством спор *Lycopodium* для определения концентрации пыльцы в осадках (Stockmarr, 1971) и для последующего расчета удельных скоростей аккумуляции.

3. Результаты и обсуждение

Спорово-пыльцевой анализ оторфованного суглинка и торфа из скважины Кич показал, что содержание пыльцы лиственницы оставалось очень низким до 700 кал. л. н. (< 1%), после чего немного увеличилось, достигая 0,3-3,5%. Как известно, низкое содержание пыльцы лиственницы в осадках связано в первую очередь с ее плохой сохранностью при фоссилизации, поэтому даже такой рост доли пыльцы *Larix* указывает на увеличение ее роли в составе лесов в процессе расширения ареала лиственницы.

Содержания пыльцы ели демонстрирует небольшой рост после 400 кал. л. н. Если до этого времени ее доля не превышала 2,7%, то после она возросла до 2,4-6,1%. Увеличение доли пыльцы лиственницы, а затем и ели в спорово-пыльцевых спектрах можно объяснить сукцессионными изменениями, которые развиваются и в настоящее время на нормально дренированных местообитаниях Центральной Камчатки (Нешатаева, 2009).

Концентрация пыльцы определяется для каждого таксона индивидуально и не зависит от количества пыльцы других таксонов в том же образце, что дает возможность проследить изменения по разрезу даже для растений, продуцирующих мало пыльцы (Борисова, 2011). Как и доля в спорово-пыльцевых спектрах, концентрации пыльцы хвойных деревьев в исследуемых осадках остаются низкими на протяжении всего разреза. Однако, в то время как процентные содержания пыльцы *Larix* и *Picea* в верхней части керна возрастают, концентрация пыльцы ели за весь исследованный период практически не изменяется, а концентрация пыльцы лиственницы даже снижается. Эти изменения концентраций объясняются закономерным снижением плотности торфа в верхней части разреза.

Для того, чтобы избежать влияния этого види-

мого «увеличения» скорости накопления отложений во времени, необходимо провести подсчет удельных скоростей аккумуляции (УСА) пыльцы, который учитывает изменения скорости осадконакопления на каждом этапе формирования исследуемой толщи (Борисова, 2011). Анализ графиков УСА для лиственницы и ели показывает, что продуктивность лиственницы была сравнительно высокой 2250-1650 кал. л. н., затем снизилась и снова возросла около 700 кал. л. н. УСА пыльцы ели оставались относительно низкими вплоть до 400 кал. л. н., после чего возросли. Таким образом, поступление пыльцы этих хвойных деревьев на поверхность почвы действительно увеличилось после 700 кал. л. н., что, вероятно, отражает как увеличение их пыльцевой продуктивности, так и рост доли в местных лесных сообществах при наступлении более благоприятных климатических условий.

Анализ опубликованных данных, посвященных голоценовой истории растительности и климата Камчатки, показал, что ландшафтно-климатические изменения происходили в разных частях полуострова не одновременно (Dirksen et al., 2013). Исследование разрезов на юге ЦКД показывают присутствие пыльцы хвойных пород в осадках на протяжении всего голоцена и заметное увеличение ее содержания после 840 кал. л. н. (Брайцева и др., 1968; Dirksen et al., 2013). Своего максимального распространения «хвойный остров» на юге ЦКД достиг около 450-320 кал. л. н. (Dirksen et al., 2013).

Согласно нашим данным, на севере ЦКД лиственничники начали распространяться примерно на 100-150 лет позже, чем в южных частях депрессии. Возможно, это может быть свидетельством того, что рефугиумы лиственницы располагались в основном в южной части депрессии, и поэтому при наступлении благоприятных условий распространение лиственничников на юге депрессии началось раньше. При этом ель, в ходе сукцессии сменяющая лиственницу в качестве лесобразующей породы, стала расширять свой ареал после 400 кал. л. н. на всем пространстве ЦКД.

4. Заключение

Таким образом, наше исследование подтверждает заметное расширение «хвойного острова» в ЦКД в конце голоцена, которое происходило на севере депрессии приблизительно на 100-150 лет позже, чем на юге. Возможно, эта разница объясняется более южным расположением гляциальных рефугиумов хвойных пород.

Благодарности

Авторы выражают благодарность О.К. Борисовой за советы при написании этой работы, Д.Д. Воронцову и А.Л. Захарову за помощь при сборе полевых материалов.

Полевые работы выполнены за счет Мегагранта (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021), лабораторные исследования выпол-

нены в рамках проекта РФФ № 21-77-10102, палинологические исследования проведены по Госзаданию ИГ РАН FMWS-2024-0005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют отсутствие конфликта интересов.

Список литературы

Борисова О.К. 2011. Интерпретация палинологических данных с учетом концентрации и скорости аккумуляции пыльцы и спор. В сборнике: Проблемы современной палинологии. Материалы XIII Российской палинологической конференции с международным участием, с. 85-89.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С. и др. 1968. Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки. М.: Наука.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: ОГИЗ, ГЕОГРАФИЗ.

Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. 2021. Применение пропионового ангидрида при пробоподготовке проб для спорово-пыльцевого анализа. *Nature Conservation Research*. Заповедная наука. 6(3): 110-112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Нешатаева В.Ю. 2009. Растительность полуострова Камчатка. М.: т-во науч. изданий КМК.

Скиба Л.А. 1975. История развития растительности Камчатки в позднем кайнозое. М.: Наука.

Хотинский Н.А. 1977. Голоцен Северной Евразии: опыт трансконтинентальной корреляции этапов развития растительности и климата. М.: Наука.

Dirksen V., Dirksen O., Diekmann B. 2013. Holocene vegetation dynamics and climate change in Kamchatka Peninsula, Russian Far East. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 190: 48–65. DOI: [10.1016/j.revpalbo.2012.11.010](https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.11.010)

Stockmarr J. 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et spores*. 13: 614-621.

Zelenin E., Gurinov A., Garipova S., Zakharov A. 2023. Geomorphology of the Central Kamchatka Depression, the Kamchatka Peninsula, NE Pacific. *Journal of Maps*. 19(1): 2252006. DOI: [10.1080/17445647.2023.2252006](https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2252006)

Diatoms of surface bottom sediments of lakes in Mongolia

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Popova D.N.^{1*}, Pestryakova L.A.¹, Levina S.N.¹, Rydaya N.A.²

¹M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Belinskogo Str., 58, Yakutsk, 677000, Russia

²Institute of Archeology and Ethnography SB RAS, Academician Lavrentiev Ave., 17, Novosibirsk 630090 Russia

ABSTRACT. This paper presents data on lake sediments that were selected from 5 lakes in Mongolia (10 points); the lakes are located at different absolute elevations above sea level. The purpose of this work is to study diatoms from surface bottom sediments (0-2 cm). In addition, the morphometric and physicochemical characteristics of the water in these lakes were studied. The water of the studied lakes was mainly ultra-fresh (40% of the lakes), the remaining 60% had fresh, slightly fresh and salt water (20% each). Such morphometric parameters as the area of the water surface, the length and width of the lake, the average width, the maximum depth and others were studied. As a result of studying the composition of diatoms, 111 species were identified that belong to 3 classes of *Bacillariophyta*. In terms of the number of species discovered, Lake Boon-Tsagan-Nuur turned out to be the richest. 10 species are classified as dominants, among them *Staurosira venter* can be distinguished; among the common species, *Pseudostaurosira brevistriata* stands out, which is dominant and subdominant in 5 samples; *Stephanocyclus meneghinianus*, *Lindavia radiosa* - dominants and subdominants in 4 samples. The diatom flora of the studied reservoirs shows that bottom forms predominate in the lakes.

Keywords: bottom sediments, diatoms, Mongolia, lake, diatom analysis

For citation: Popova D.N., Pestryakova L.A., Levina S.N., Rydaya N.A. Diatoms of surface bottom sediments of lakes in Mongolia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 528-533. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-528

1. Introduction

Thanks to its unique physical and geographical position, the landscapes of Mongolia are very diverse and unique. Here you can see high mountains covered with ice, large freshwater and saltwater lakes, spacious plains, deserts and large rivers (Orkhonselenge et al., 2022). Therefore, this area is of great interest for studying biodiversity and natural conditions.

Not many studies have been devoted to the study of bottom sediments in Mongolia, so the use of paleolimnological methods such as diatom analysis allows us to understand how lake ecosystems developed in the past, therefore, the study of the modern composition of diatoms serves as the basis for reconstructing the paleolimnological conditions of lakes.

Research on diatoms in Mongolian lakes dates back to the 20th century (Dorofeyuk and Tsetsegmaa, 2002). The book by N.I. Dorofeyuk and D. Tsetsegmaa (2002) fully describes the taxonomy of the algal flora of Mongolia. They recorded 1574 species and varieties

of algae, of which the greatest taxonomic diversity is the diatom division (*Bacillariophyta*). One of the large-scale works is the research of Metzeltin et al. (2009). They studied mainly in the Khentei region and covered approximately 615 taxa, 65 taxa (64 from Mongolia) described as new to science.

2. Materials and methods

The materials for this work were collected as part of the «PaleoAltai» expedition in the lakes of the Mongolian Altai. The object of our study is the diatoms of 5 lakes located in the western and southern parts of Mongolia, mainly in mountainous areas (Fig. 1).

The height above sea level varies from 1310 (Boon-Tsagan-Nuur) to 2670 m Lake Khuiten-Nuur. The main features of the climate of Mongolia boil down to the following: sharp continentality, changes in the climatic regime within a small area as a result of changes in orographic and hypsometric conditions, significant dry air and low amounts of precipitation, cold and long

*Corresponding author.

E-mail address: diananp-92@mail.ru (D.N. Popova)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



winters (Murzaev, 1952).

Technical processing of samples and preparation of permanent preparations for diatom analysis were carried out according to standard methods (Diatom analysis, 1949; Davydova, 1985; Pestryakova, 2016, etc.). When identifying diatoms, both domestic and foreign systematic and floristic reports were used (Krammer, 1986; Barinova et al., 2006; Genkal, 2013, etc.).

3. Results and discussion

In terms of water surface area, most of the studied lakes are small (from 4,14 km² Tigil-Nuur to 4,18 km² Tuvshin-Nuur). The maximum depth ranges from 0,5 m (Tuvshin-Nuur) to 16 m (Boon-Tsagan-Nuur). In terms of percentage, most lakes belong to reservoirs with average depth (60%). The studied water bodies are fresh in terms of the degree of mineralization (up to 1000 mg/l). The exception is Lake Boon-Tsagan-Nuur with a salinity of 9015,4 mg/l or has brackish water. In terms of hydrogen index (pH), the indicators vary from 8,4 to 9,5, all lakes have an alkaline environment, except for Lake Tigil-Nuur, where the water has a slightly alkaline environment. The hardness of lake water varies widely from “very soft” to “very hard” waters (Boon-Tsagan-Nuur-5 and Tuvshin-Nuur).

In the taxonomic composition, the families *Naviculaceae*, *Bacillariaceae*, *Staurosiraceae*, which include 4 genera each, are distinguished by the most numerous generic saturation. The list of genera with the greatest diversity includes the genus *Navicula* (9 species). In terms of the number of recorded species, Lake Boon-Tsagan-Nuur turned out to be the richest (4 points), including 62 species, with Khuiten-Nuur in second place - 37. 10 species are classified as dominants (abundance in the flora more than 10%); highlight *Staurosira venter*, which is dominant in 6 samples out of 10, reaching 86,6% in the flora of Tal-Nuur-3. Also among the mass species, we highlight the species *Pseudostaurosira brevistriata*, which is dominant and subdominant in 5 samples, reaching 14,4% of the flora in Lake Boon-Tsagan-Nuur-2, *Stephanocyclus meneghinianus*, *Lindavia radiosa* - dominants and subdominants in 4 samples. The concentration of diatom valves, calculated in one gram of sediment in the studied lakes, ranged from 0,2 (Boon-Tsagan-Nuur-2) to 148,9 million/g (Tal-Nuur-3). High concentrations of valves were noted in lakes Tigil-Nuur, Tal-Nuur, Khuiten-Nuur; in all lakes, the concentration of valves was influenced by the number of *Staurosira venter*, the amount of which in the noted lakes reaches 87% of the total number of valves. The diatom flora of the studied reservoirs shows that bottom forms predominate in the lakes (59%). In relation to salinity, most species are indifferent, typically freshwater (55%). In relation to the hydrogen index (pH) there are diatoms for 82.2% of the flora with a predominance of alkaliphiles (47.7%). In terms of preference for temperature conditions, the number of species in the flora was dominated almost equally by cosmopolitan and boreal species, 44.1 and 36%, respectively.



Fig.1. Orography scheme of the Altai mountain system according to Bulanov (2005) and the location of lakes in the Mongolian Altai

4. Conclusions

The research results allow us to draw the following generalizations and conclusions:

The diatom flora of the studied lakes, which represent an important group of environmental indicators, includes 111 species, most of the taxa are represented by the class *Bacillariophyceae*; In the taxonomic composition, the families *Naviculaceae*, *Bacillariaceae*, *Staurosiraceae* are distinguished by the most numerous generic saturation; In terms of the number of recorded species, Lake Boon-Tsagan-Nuur turned out to be the richest; 10 species are classified as dominants, among them *Staurosira venter*; Among the common species, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Stephanocyclus meneghinianus*, and *Lindavia radiosa* stand out. The diatom flora of the studied reservoirs shows that bottom forms predominate in the lakes; In relation to salinity, most species are indifferent, typically freshwater; In relation to the pH value, alkaliphiles predominate; In terms of preference for temperature conditions, the number of species in the flora was dominated almost equally by cosmopolitan and boreal species.

5. Acknowledgments

The work was supported by the Russian Science Foundation, project 20-17-00110 “Changes in climate and biodiversity of the Altai mountainous country in the Holocene (based on the results of a comprehensive study of high-resolution paleo-records from bottom sediments of lakes)” and according to the project part of the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and higher education of the Russian Federation on the instructions of FSRG-2023-0027.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Krammer K. 1986. Bacillariophyceae. Teil 1: Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa.
- Metzeltin D., Lange-Bertalot H., Soninkhishig N. 2009. Diatoms in Mongolia. *Iconographia Diatomologica* 20: 1–686.
- Orkhonselenge A., Uuganzaya M., Davaagatan T. 2022. Lakes of Mongolia. Geomorphology, Geochemistry and Paleoclimatology..Syntheses in Limnogeology.
- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Biodiversity of environmental indicator algae. Pilies Studio, Tel Aviv.
- Bulanov S.A. 2005. Altai. Great Russian Encyclopedia 1. Moscow.
- Genkal S.I. 2013. Morphometric variability, taxonomy and distribution of *Cyclotella Bodanica* Eulenstein (Bacillariophyto) in Russia / S. I. Genkal, E. Yu. Mitrofanova, M. S. Kulikovskiy. Moscow: Science: 3.
- Davydova N.N. 1985. Diatoms are indicators of the ecological conditions of water bodies in the Holocene.
- Diatom analysis. 1949. L.: Gosgeolizdat, Book 1.
- Dorofeyuk N.I., Tsetsegmaa D. 2002. Abstract of the algal flora of Mongolia. In: Ulziyhutag P.D. (Ed.) Gunin. Biological resources and natural conditions of Mongolia: Proceedings of the Joint Russian-Mongolian complex of biological expeditions, 42. M.: Nauka.
- Murzaev E. M. 1952. Mongolian People's Republic: Physical and geographical description. (2nd ed.). M.: Geographgiz.
- Pestryakova L.A. 2016. Paleoeology. Methodological foundations of paleoecology: educational manual. Yakutsk: Publishing house of the North-Eastern Federal University.

Диатомовые водоросли поверхностных донных отложений озер Монголии

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПопова Д.Н.^{1*}, Пестрякова Л.А.¹, Левина С.Н.¹, Рудая Н.А.²¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова», ул. Беллинского, 58, Якутск, 677000, Россия² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт археологии и этнографии Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. В настоящей работе приведены данные по озерным отложениям, которые были отобраны из 5 озер Монголии (10 точек), озера располагаются на различных абсолютных отметках над уровнем моря. Целью данной работы является изучение диатомовых водорослей из поверхностных донных отложений (0-2 см). Помимо этого, были изучены морфометрические и физико-химические характеристики воды данных озер. Вода исследуемых озер, в основном, ультрапресная (40% озер), остальные 60 % имели пресную, слабопресную и соленую воду (по 20% соответственно). Были исследованы такие морфометрические параметры как площадь водного зеркала, длина и ширина озера, средняя ширина, максимальная глубина и другие. В результате изучения состава диатомовых водорослей было выявлено 111 видов, которые относятся к 3 классам *Bacillariophyta*. По количеству обнаруженных видов наиболее богатым оказалось озеро Боон-Цаган-Нуур. К числу доминантов отнесены 10 видов, среди них можно выделить *Staurosira venter*, среди массовых видов выделяются *Pseudostaurosira brevistriata*, который является доминантом и субдоминантом в 5 пробах, *Stephanocyclus meneghinianus*, *Lindavia radiosa* – доминанты и субдоминанты в 4 пробах. Диатомовая флора исследованных водоемов показывает, что в озерах преобладают донные формы.

Ключевые слова: донные отложения, диатомовые водоросли, Монголия, озеро, диатомовый анализ

Для цитирования: Попова Д.Н., Пестрякова Л.А., Левина С.Н., Рудая Н.А. Диатомовые водоросли поверхностных донных отложений озер Монголии // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 528-533. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-528

1. Введение

Благодаря, своему уникальному физико-географическому положению, ландшафты Монголии отличаются большим разнообразием и неповторимостью. Здесь можно увидеть высокие горы, покрытые льдом, большие пресноводные и соленые озера, просторные равнины, пустыни и крупные реки (Orkhonselenge et al., 2022). Поэтому, данная территория представляет большой интерес для изучения биоразнообразия и природных условий.

Не так много исследований посвящено изучению донных отложений Монголии, поэтому применение палеолимнологических методов таких как диатомовый анализ позволяет нам понять, как развивались озерные экосистемы в прошлом, следова-

тельно, изучение современного состава диатомовых водорослей выступает базой для реконструкции палеолимнологических условий озер.

Исследования диатомовых водорослей в монгольских озерах берет свое начало еще XX в. (Дорофеюк и Цэцэгмаа, 2002).

В книге Н.И. Дорофеюк, Д. Цэцэгмаа (2002) полно описана систематика альгофлоры Монголии. Они зарегистрировали 1574 вида и разновидностей водорослей, из них наибольшим таксономическим разнообразием является отдел диатомовых водорослей (*Bacillariophyta*). Одной из широкомасштабных работ является исследование Metzeltin et al. (2009). Они исследовали в основном в районе Хентэя и охватывают примерно 615 таксонов, 65 таксонов (64 из Монголии) описаны как новые для науки.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: diananp-92@mail.ru (Д.Н. Попова)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Материалы для данной работы были собраны в рамках экспедиции «PaleoAltai» в озерах монгольского Алтая. Объектом нашего исследования являются диатомовые водоросли 5 озер, расположенных в западной и южной частях Монголии, преимущественно в горной местности (Рис. 1).

Высота над уровнем моря варьирует от 1310 (Боон-Цаган-Нуур) до 2670 м озеро Хуйтэн-Нуур. Основные черты климата Монголии сводятся к следующему: резкая континентальность, изменение климатического режима в пределах небольшой территории в результате изменения орографических и гипсометрических условий, значительная сухость воздуха и малое количество атмосферных осадков, холодная и длительная зима (Мурзаев, 1952).

Техническая обработка проб и приготовление постоянных препаратов на диатомовый анализ выполнялись по стандартной методике (Диатомовый анализ, 1949; Давыдова, 1985; Пестрякова, 2016 и др.). При выявлении диатомей использовались как отечественные, так и зарубежные систематические и флористические сводки (Krammer, 1986; Баринаева и др., 2006; Генкал, 2013 и др.).

3. Результаты и их обсуждение

По площади водного зеркала большинство исследованных озер относится к малым (от 4,14 км² Тигил-Нуур до 4,18 км² Тувшин-Нуур). По максимальной глубине значения от 0,5 м (Тувшин-Нуур) до 16 м (Боон-Цаган-Нуур). По процентному соотношению большинство озер относится к водоемам со средней глубиной (60%). Изученные водоемы по степени минерализации являются пресными (до 1000 мг/л). Исключение составляет озеро Боон-Цаган-Нуур с минерализацией 9015,4 мг/л или имеет солоноватую воду. По водородному показателю (рН) показатели варьируют от 8,4 до 9,5, все озера имеют щелочную среду, кроме озера Тигил-Нуур, где вода имеет слабощелочную среду. Жесткость озерной воды меняется в широких пределах от «очень мягких» до «сильно жестких» вод (Боон-Цаган-Нуур-5 и Тувшин-Нуур).

В таксономическом составе наиболее многочисленным родовым насыщением отличаются семейства *Naviculaceae*, *Bacillariaceae*, *Staurosiraceae* включающие по 4 рода. Список родов по наибольшему разнообразию включает род *Navicula* (9 видов). По количеству зафиксированных видов наиболее богатым оказался озеро Боон-Цаган-Нуур (4 точки), включающее 62 вида, на втором месте – Хуйтэн-Нуур – 37. К числу доминантов (обилие во флоре более 10%) отнесены 10 видов, среди них можно выделить *Staurosira venter*, который является доминантом в 6 пробах из 10, достигая 86,6 % во флоре Тал-Нуур-3. Так же среди массовых видов выделим виды *Pseudostaurosira brevistriata*, который является доминантом и субдоминантом в 5 пробах, достигая 14,4 % флоры в озере Боон-Цаган-Нуур-2, *Stephanocyclus meneghinianus*, *Lindavia radiosa* – доми-



Рис.1. Схема орографии Алтайской горной системы по Буланову (2005) и расположение озер в монгольском Алтае

наны и субдоминанты в 4 пробах. Концентрация створок диатомей, рассчитанная в одном грамме осадка в изученных озерах, колебалась от 0,2 (Боон-Цаган-Нуур-2) до 148,9 млн/г (Тал-Нуур-3). Высокие значения концентрации створок отмечены в озерах Тигил-Нуур, Тал-Нуур, Хуйтэн-Нуур, во всех озерах на концентрацию створок влияло количество *Staurosira venter*, количество которого в отмеченных озерах доходит до 87 % от общего числа створок. Диатомовая флора исследованных водоемов показывает, что в озерах преобладают донные формы (59%). По отношению к солености большинство видов индифферентны, типично пресноводные (55%). По отношению к водородному показателю (рН) имеются для 82,2 % флоры диатомей с преобладанием алкалифилов (47,7 %). По предпочтению к температурным условиям по количеству видов во флоре преобладали почти в равной мере космополитные и бореальные виды по 44,1 и 36 % соответственно.

4. Заключение

Результаты исследований позволяют сделать следующие обобщения и выводы:

Диатомовая флора изученных озер, представляющих собой важную группу индикаторов состояния окружающей среды, включает 111 видов, большинство таксонов представлены классом *Bacillariophyceae*; В таксономическом составе наиболее многочисленным родовым насыщением отличаются семейства *Naviculaceae*, *Bacillariaceae*, *Staurosiraceae*; По количеству зафиксированных видов наиболее богатым оказался озеро Боон-Цаган-Нуур; К числу доминантов отнесены 10 видов, среди них можно выделить *Staurosira venter*; Среди массовых видов выделяются *Pseudostaurosira*

brevistriata, *Stephanocyclus meneghinianus*, *Lindavia radiosa*. Диатомовая флора исследованных водоемов показывает, что в озерах преобладают донные формы; По отношению к солености большинство видов индифферентны, типично пресноводные; По отношению к водородному показателю (рН) преобладают алкалифилы; По предпочтению к температурным условиям по количеству видов во флоре преобладали почти в равной мере космополитные и бореальные виды.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 20-17-00110 «Изменения климата и биоразнообразия Алтайской горной страны в голоцене (по результатам комплексного изучения высокоразрешающих палеозаписей из донных отложений озер)» и по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования РФ по заданию FSRG-2023-0027.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Барина С.С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. 2006. Биологическое разнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Pilies Studio, Tel Aviv.
- Буланов С.А. 2005. АЛТАЙ. Большая российская энциклопедия. Том 1. Москва.
- Генкал С.И. 2013. Морфометрическая изменчивость, таксономия и распространение *Cyclotella Bodanica* Eulenstein (Bacillariophyta) в России. М.: Наука.
- Давыдова Н.Н. 1985. Диатомовые водоросли – индикаторы экологических условий водоемов в голоцене. Л. Наука.
- Диатомовый анализ. 1949. Л., Госгеолгиздат.
- Дорофеюк Н.И., Цэцэгмаа Д. 2002. Конспект флоры водорослей Монголии. Биологические ресурсы и природные условия Монголии: Труды Совм. Рос.-Монг. компл. биол. экспедиции.
- Мурзаев Э. М. 1952. Монгольская Народная Республика: Физико-географическое описание. М.: Географгиз.
- Пестрякова Л.А. 2016. Палеоэкология. Методологические основы палеоэкологии : учебно-методическое пособие. Якутск: Издательский дом Северо-Восточного федерального университета.
- Krammer K. 1986. Bacillariophyceae. Teil 1: Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa.
- Metzeltin D., Lange-Bertalot H., Soninkhishig N. 2009. Diatoms in Mongolia. *Iconographia Diatomologica* 20: 1–686.
- Orkhonselenge A., Uuganzaya M., Davaagatan T. 2022. Lakes of Mongolia. *Geomorphology, Geochemistry and Paleoclimatology. Syntheses in Limnogeology*.

A preliminary study of subfossil Cladocera from the bottom sediments of Lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals, Russia)



Nigmatullin N.M.¹, Nurgaliev D.K.¹, Frolova L.A.^{1,2*}

¹Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 4/5, Kazan, 420008, Russia

²Institute of archaeology and ethnography of the Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Avenue 17, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. An analysis of subfossil cladocerans from the sediment core of Lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals) was conducted. In all, 38 cladoceran taxa from 7 families were identified. Most of them fell within the family Chydoridae. Yet, another family, Bosminidae, turned out to be represented by the largest number of individuals. The assemblage was dominated by *Bosmina (Eubosmina) longispina*. Relatively high concentrations were also characteristic of the *Daphnia longispina* gr., *Chydorus* cf. *sphaericus*, and *Alona quadrangularis*. The age of the studied core spans the Late glacial and entire Holocene, the maximum age of the sediment core was 13.5 yr BP (Valieva et al., 2023). In the lower layers of the core at the beginning of the Holocene, the discovered Cladocera remains were few and characterized by low species richness. The most significant transformations in the Cladocera community occurred at the end of the Late Dryas - beginning of the Holocene (11400-11950 cal. yr BP), indicating substantial changes in environmental conditions.

Keywords: Southern Urals, Lake Bolshoe Miassovo, paleolimnology, subfossil Cladocera, Holocene

For citation: Nigmatullin N.M., Nurgaliev D.K., Frolova L.A. A preliminary study of subfossil Cladocera from the bottom sediments of Lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 534-537. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-534

1. Introduction

Lake Bolshoe Miassovo stretches across the eastern foothills of the Ilmen Mountains in the Southern Urals (Rogozin and Gavrilkina, 2015). Cladocerans are considered as keystone elements of aquatic ecosystems and have been widely recognized as a paleoclimate proxy during the past decades (Frolova, 2018). A number of crustaceans native to certain lakes in the Southern Urals have been studied as early as the middle of the 20th century to explore the feeding habits of fish or make fisheries more sustainable (Kaluga and Fatkullin, 2019). Yet, cladocerans have often been dismissed by researchers. Their subfossil and recent communities still hold many secrets and surprises.

2. Materials and Methods

A 524-cm-long sediment core was obtained from Lake Bolshoe Miassovo (55°08'57" N, 60°16'32" E) with a special hydraulic corer as part of the summer expedition organized by Kazan Federal University in 2018.

For paleobiological analysis of subfossil cladocerans, 54 sediment samples were used. Prior treatment of the samples was carried out using the standard methods (Korhola and Rautio, 2001). Radiocarbon dating of sediment samples was conducted at the National Taiwan University (NTUAMS Laboratory, Taipei, Taiwan). A detailed age model is provided in the article by Valieva E.A. (Valieva et al., 2023).

3. Results and Discussion

The results show that the zootanocenosis of Lake Bolshoe Miassovo comprises 38 cladoceran taxa from 7 families. Chydoridae family is represented by the highest number of taxa (27 taxa). The cladoceran assemblage is dominated by *B. (E.) longispina* (57.65%). Relatively high concentrations were also characteristic of the *D. longispina* gr., *C. cf. sphaericus* and *A. quadrangularis*. A rich phytophilous littoral complex of species was also established: *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *Alona affinis*, *Eurycercus* sp., *Acroperus harpae*, *Alonella nana*, etc. Yet, these taxa were much less abundant than

*Corresponding author.

E-mail address: larissa.frolova@kpfu.ru (L.A. Frolova)

Received: June 01, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the pelagic ones. This can be attributed to the geological features of the lake, such as a deep basin and poorly developed littoral area. Littoral taxa (80%) have the highest taxonomic diversity, while pelagic taxa (20%) are less diverse.

The sediment core under study was divided into 2 ecological zones. In the lower part of Zone I, *B. (E.) longispina* prevails. The structure of the cladoceran assemblage gets completely different with depth (1400-11950 yr BP). Here, the dominant position becomes taken over by the large-sized daphnia *D. longispina* gr. and *Daphnia pulex* gr., the abundance of which reduces upwards. The dominance of planktonic forms of Cladocera, such as *Daphnia*, indicates the presence of deep areas in the lake. This drastic shift in dominant species may be related to changes in the composition of predatory organisms. The average saprobity index in this zone was 1.38, which characterizes the water body as oligosaprobic.

Zone II is characterized by the absolute dominance of *B. (E.) longispina* and the increased abundance of *C. cf. sphaericus*. During this period, the lake had a well-developed pelagic zone, deeper waters, and higher trophic status. The concentration of fossil remains grew upwards, which may indicate improved conditions for the abundant development of cladocerans. Littoral-phytophilous taxa are extremely diverse, yet registered as single individuals and in low concentrations. The value of the saprobity index remains almost unchanged and corresponds to the oligosaprobic type of waters (1.40).

4. Conclusions

This study reconstructs the evolutionary history of Lake Bolshoe Miassovo in the Southern Urals based on the results of the analysis of subfossil cladocerans from its sediment core. A total of 38 cladoceran taxa were identified. Among the identified species, *B. (E.) longispina*, a typical deep-water dweller, was dominant: it accounted for more than half of all chitinous remains. Most of them fell within the family Chydoridae. Yet, another family, Bosminidae, turned out to be represented by the largest number of individuals. In the

early Holocene, cladoceran remains were few and not diverse as a consequence of the unfavorable climatic and paleoecological conditions of that period. Based on the radiocarbon dating, the age of the bottom sediments was estimated around 13 500 years. At the initial stage of the lake development, only single cladoceran remains were found.

Acknowledgements

The environmental changes in Lake Bolshoe Miassovo were reconstructed within the framework of the Strategic Academic Leadership Program of Kazan Federal University (Priorities–2030).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Frolova L.A. 2018. Cladocera from bottom deposits as an indicator of changes in climate and ecological conditions, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 107(1): 012084. DOI: [10.1088/1755-1315/107/1/012084](https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012084)
- Kaluga I.A., Fatkullin R.R. 2019. The species composition of phyto- and zooplankton in fishponds of the Southern Urals. In: Proceedings of the All-Russian (National) Scientific-Practical Conference: Current Problems and Scientific Support of the Development of Modern Animal Breeding. Kurgan, pp 291–295 (in Russian).
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), Tracking environmental change using lake sediments. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2)
- Rogozin A.G., Gavrilkina S.V. 2015. Long-term variations of the thermal regime of Lake Bol'shoe Miassovo (South Urals) as a result of the climate warming. Russ Meteorol Hydrol 40:561–564. doi:[10.3103/S1068373915080099](https://doi.org/10.3103/S1068373915080099) (in Russian).
- Valieva E.A., Frolova L.A., Palagushkina O.V., Nigamatzyanova G.R., Nurgaliev D.K. 2023. Late glacial and Holocene history of lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals) based on diatom analysis of bottom sediments 54: 195-206. DOI: [10.31857/S2949178923040151](https://doi.org/10.31857/S2949178923040151)

Предварительные данные о составе субфоссильных Cladocera в донных отложениях озера Большое Миассово (Южный Урал)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНигматуллин Н.М.¹, Нургалиев Д.К.¹, Фролова Л.А.^{1,2*}¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18² Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирская обл., Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 17

АННОТАЦИЯ. Были проведены исследования субфоссильных Cladocera в колонке донных отложений озера Большое Миассово (Южный Урал). Обнаруженные остатки кладоцер принадлежали представителям 7 семейств и 38 таксонов. Наиболее разнообразно было представлено семейство Chydoridae, но по количественным показателям они уступали семейству Bosminidae. Доминирующее положение в сообществе занимали *Bosmina (Eubosmina) longispina*. В группу второстепенных таксонов вошли *Daphnia longispina* gr., *Chydorus* cf. *sphaericus* и *Alona quadrangularis*. Возраст исследованной колонки донных отложений составил 13.5 тыс. лет (Valieva et al., 2023). В нижней части колонки в начале голоцена обнаруженные остатки Cladocera малочисленны и характеризуются низким видовым богатством. Наиболее значимые трансформации в сообществе Cladocera происходили в конце позднего дриаса - в начале голоцена (11400-11950 кал. л.н.) указывая на существенные изменения условий окружающей среды.

Ключевые слова: Южный Урал, Большое Миассово, палеолимнология, субфоссильные Cladocera, Голоцен

Для цитирования: Нигматуллин Н.М., Нургалиев Д.К., Фролова Л.А. Предварительные данные о составе субфоссильных Cladocera в донных отложениях озера Большое Миассово (Южный Урал) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 534-537. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-534](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-534)

1. Введение

Озеро Большое Миассово расположено в восточных предгорьях Ильменского хребта – одной из южных оконечностей Уральских гор (Рогозин и Гаврилкина, 2015).

Cladocera, являясь значимой группой водной экосистемы, в последние десятилетия все чаще используется в реконструкциях палеоклимата (Frolova, 2018). Исследования ракообразных некоторых озер Южного Урала начаты с середины 20 века. Многие из них были связаны с изучением кормовой базы рыб, проводимые с целью улучшения рационального ведения рыбоводства (Калуга и Фаткуллин, 2019). Однако работ, связанных с изучением рецентных и субфоссильных Cladocera крайне мало.

2. Материал и методы

В ходе летней научно-исследовательской экспедиции 2018 году сотрудниками Казанского

федерального университета гидравлическим пробоотборником была отобрана колонка донных отложений длиной 524 см из озера Большое Миассово (55°08'57" с.ш., 60°16'32" в.д.). Для палеобиологического анализа субфоссильных Cladocera было использовано 54 образца. Пробоподготовку производили по стандартной методике (Korhola and Rautio, 2001). Радиоуглеродное датирование образцов донных отложений было проведено в Национальном Тайваньском университете (Лаборатория NTUAMS, Тайпэй, Тайвань). Подробная возрастная модель приведена в статье Валиевой Э.А. (Valieva et al., 2023).

3. Результаты и обсуждения

В составе зоотанатоценозов озера Большое Миассово обнаружено 38 таксонов группы Cladocera, принадлежащих 7 семействам. По количеству таксонов лидировало семейство Chydoridae (27 таксонов). В таксотанатоценозе Cladocera доминантом

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lariisa.frolova@kpfu.ru (Л.А. Фролова)

Поступила: 01 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



оказалась *B. (E.) longispina* (57.65%). К второстепенным таксонам были отнесены *D. longispina* gr., *C. cf. sphaericus* и *A. quadrangularis*. Также был выявлен богатый фитофильно-литоральный комплекс видов, состоящий из *C. cf. sphaericus*, *A. quadrangularis*, *A. affinis*, *Eurycercus* sp., *A. harpae*, *Alonella nana* и других таксонов, но в малых количествах по отношению к пелагическим организмам. Это объясняется геологическим строением озера, которая имеет глубокую котловину и слабо развитую литоральную часть. В субфоссиальном сообществе кладоцер наиболее таксономический разнообразными оказались обитатели прибрежных зон (80%), таксоны характерные для пелагиалей (20%) имеют меньшее разнообразие.

В колонке донных отложений были выделены две экологические зоны. Нижняя часть зоны I характеризуется доминированием *B. (E.) longispina*. В период 11 400-11 950 кал. л.н., наблюдается резкая смена в структуре сообщества рачков, доминирующее положение занимают крупные дафнии: *D. longispina* gr. и *Daphnia pulex* gr., число которых равномерно падает к верхней части горизонта. Доминирование таких планктонных форм кладоцер как дафнии указывает на наличие глубоких участков в озере. Такая кардинальная смена доминантов, возможно, связана с изменениями в составе хищных организмов. Среднее значение индекса сапробности в этой зоне составила 1.38, что характеризует водоем как олигосапробный.

Зона II характеризуется абсолютным доминированием *B. (E.) longispina* и увеличением численности *C. cf. sphaericus*. Мы можем говорить о наличии хорошо развитой пелагиали и больших глубин, и увеличении трофического статуса водоема. Концентрация фоссилизированных остатков увеличивается по мере продвижения вверх по колонке, что может указывать на улучшение условий для обильного развития кладоцер. Было выявлено большое разнообразие литорально-фитофильных таксонов, которые фиксировались в единичных экземплярах и имели низкие концентрации остатков. Среднее значение индекса сапробности практически не менялся, по-прежнему соответствуя олигосапробному типу водоемов (1.40).

4. Выводы

Было проведено исследование истории развития крупного озера Большое Миассово, расположенного на Южном Урале, основанная на анализе

субфоссиальных Cladocera. Радиоуглеродное датирование показало, что колонка донных отложений имеет возраст 13.5 тыс. лет. В общей сложности было идентифицировано 38 таксонов Cladocera. В сообществе доминировала *B. (E.) longispina*, характерная для глубоких водоемов, на долю которой приходится больше половины обнаруженных хитинизированных остатков. Наиболее разнообразно представлено семейство Chydoridae, но по количественным показателям они уступают семейству Bosminidae. В начале голоцена обнаруженные остатки Cladocera в колонке донных отложений малочисленны и характеризуются низким видовым разнообразием, что отражает неблагоприятные климатические и палеоэкологические условия.

Благодарности

Реконструкция экологических изменений с использованием анализа субфоссиальных Cladocera выполнена в рамках проекта РФФ № 22-47-08001.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Калуга И.А., Фаткуллин Р.Р. 2019. Видовой состав фито- и зоопланктона рыбных прудов в условиях Южного Урала. Сборник статей по материалам Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы и научное обеспечение развития современного животноводства». С. 291-295.
- Рогозин А.Г., Гаврилкина С.В. 2015. Многолетние изменения теплового режима озера Большое Миассово (Южный Урал) в результате потепления климата. Метеорология и гидрология. 8: 98-102.
- Frolova L.A. 2018. Cladocera from bottom deposits as an indicator of changes in climate and ecological conditions, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 107/ issue 1, no 012084. DOI: [10.1088/1755-1315/107/1/012084](https://doi.org/10.1088/1755-1315/107/1/012084)
- Korhola A., Rautio M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans. In: Smol, J.P., Birks, H.J.B., Last, W.M. (Eds.), Tracking environmental change using lake sediments. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 4: 125-165. DOI: [10.1007/0-306-47671-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47671-1_2).
- Valieva E.A., Frolova L.A., Palagushkina O.V., Nigamatzyanova G.R., Nurgaliev D.K. 2023. Late glacial and Holocene history of lake Bolshoe Miassovo (Southern Urals) based on diatom analysis of bottom sediments 54: 195-206. DOI: [10.31857/S2949178923040151](https://doi.org/10.31857/S2949178923040151)

Modern sedimentation in lakes Chukcha and Bezmyyanka, Okhotsk coast



Pozhidaeva D.K.^{1,2*}, Minyuk P.S.¹

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo, Far East Branch of Russian Academy of Sciences, 16 Portovaya St., Magadan, 685000, Russia

²Kazan Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies, 4/5 Kremlevskaya st., Kazan 420008, Russia

ABSTRACT. Lakes Chukcha (59°31'56" N; 147° 23'07" E) and Bezmyyanka (59°29'56" N; 147°21'02" E) located in the Kava-Tau depression, in the norther cost of Sea of Okhotsk. The thickness of the sediments, rock magnetic properties, sedimentation rates in both lakes are different. The surface bottom sediments of Chukcha lake are heterogeneous in grain composition. The rock magnetic properties of surface sediments are controlled by the grain size. The shallow water sandy sediments show the low of MS, Jrs, Js, and high values of Jp while silt have opposite characteristics. Magnetic minerals from silt are single domain with low content of paramagnetic component. The magnetic properties of fine-grained sediments may be associated with the authigenic (hemogenic) iron sulfides and oxides.

Keywords: Holocene, rock magnetism, lake sediments

For citation: Pozhidaeva D.K., Minyuk P.S. Modern sedimentation in lakes Chukcha and Bezmyyanka, Okhotsk coast // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 538-543. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-538

1. Introduction

There are a large number of lakes on the coast of the Sea of Okhotsk. Among them, there are coastal lakes isolated from the sea (Salty, Glukhoe lakes) and lakes located in Cenozoic depressions such as Lankovaya, Kava-Tau, Gizhiga depressions. These lakes differ from many glacial mountain lakes in age, sediment composition, and sedimentation rate. The thickness of Holocene lacustrine sediments of the depressions reaches 10 m providing the high resolution of environmental record. The sediments of these lakes are characterized by high values of magnetic susceptibility, low organic matter content, and stable single-component magnetization. In this regard, they are a favorable object for studying the space/time structure of the geomagnetic field. Modern sedimentation in lakes reflect a combination of sedimentation processes and conditions both in different parts of the water basin and in the catchment area. The study of modern sedimentation contributes to a better understanding of the sedimentation of the past (Fig.1).

2. Materials and methods

Lake Chukcha (59°31'11" N; 147°22'45" E) and Bezmyyanka (59°29' 45" N; 147°20'32" E) located in

the Kava-Tau Cenozoic depression. In the east and south of the lakes are lake-marsh Holocene deposits, in the west and north – Neogene sands, pebbles, siltstones. The southern creeks flowing into lakes erode the Cretaceous volcanic rocks (Geological..., 1981). The Chukcha River flows from the northern part of Lake Chukcha. Lake Chukcha has a length and width of 5.7 km 3.5 km, respectively. The maximum water depth is 3 m. The present lake level is at 40 m a.s.l. Lake Bezmyyanka is 2.3 km long and 1 km wide. The water depth does not exceed 2.5 m.

Two sediment cores were taken from Lake Chukcha (Chk-1, 505 cm long and Chk-2 483 cm long) and from Lake Bezmyyanka (Chb-1, 936 cm long and Chb-2, 874 cm log) in the central parts of the lakes. Surface bottom samples (73 samples) were collected along profiles over the entire area of Lake Chukcha.

Magnetic susceptibility (MS) of sediments were measured on MFK 1FA kappabridge (AGICO Ltd.). Thermomagnetic analysis (TMA) was performed using MFK1-FA equipped with a CS-3 high temperature furnace (AGICO Ltd.) and a Curie express balance (Burov et al., 1986). Hysteresis parameters, including saturation magnetization (Js), induced magnetization (Ji), saturation remanence (Jrs), coercive force (Bc) and remanence coercivity (Bcr), were measured using an

*Corresponding author.

E-mail address: dashapozhidaeva01@gmail.com (D.K. Pozhidaeva)

Received: June 15, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



automatic coercive spectrometer (Burov et al., 1986). Radiocarbon analysis was performed at the NEISRI FEB RAS and at the Taiwan University. Major elements were determined using an S4 Pioneer X-ray fluorescence spectrometer (Germany). The relative content of organic material was estimated using loss on ignition (LOI) after heating the samples to 550°C.

3. Results and discussion

The general lithological features of core sediments are identical in both lakes. Massif silt dominates in the upper part of the cores, and indistinct thin-layered silt are in the lower part. Remain of water and terrestrial plants and vivianite occur in the sediments. The basal layers of Bezmyyanka Lake cores are composed by silt, sand and well-rounded fragments of woods with ages 27 ka. It is suggested that lake was formed at the alluvial plain surface.

Two AMS radiocarbon dates from Chb-1 core sediments (1661 ± 70 and 3001 ± 70 years) indicate the Holocene age of Lake Bezmyyanka. The spore-pollen spectra from the lower part of lake sediments are dominated by tree and shrub taxa *Betula*, *Alnus*, *Pinus* subgen. *Haploxylon*, which indicates a warm climate. The depth variations of MS are well correlated between cores in each lake, but comparison between lakes by this parameter is difficult which indicates a different of sedimentation history. The sediments of Lake Chukchi show higher values of MS. The composition of deposits in the catchment and the content of biogenic silica and organic matter in lake sediments control the magnitudes of magnetic susceptibility on the one hand, and the chemogenic (authigenic) formation of magnetic minerals on the other hand.

The content of SiO_2 and LOI gradually increases from the bottom up in the core Chb 1, which indicates



Fig.1. Location of the studied objects.

an increase in the bioproductivity of the lake. According to the J_{rs}/J_s and B_{cr}/B_c ratios the magnetic particles are single domain in the upper part of the core (Day et al., 1977). The sedimentary records of lakes Chukcha and Bezmyyanka represent high-resolution archives of the temporal variation of the Earth's magnetic field.

The surface bottom sediments of Chukchi lake are heterogeneous in grain composition. Beaches and shoaling consist mainly of sand, while silt and clay are dominated in the deep central part of the lake. The shallow water area wider in the western part of the lake suggesting a higher intensity of abrasion. The rock magnetic properties of surface sediments are controlled by the grain size. The shallow water sandy sediments show the low of MS, J_{rs} , J_s , and high values of J_p . The beach sand sorted by waves contains visible heavy minerals. They have a high magnetic susceptibility. The magnetic minerals from the silt of the central part of the lake are single domain with low content of paramagnetic component. The magnetic properties of fine-grained sediments may be associated with the authigenic (hemogenic) iron sulfides and oxides.

The spatial distribution of the fine size sediments at the bottom of the lake Chukcha is similar to lake Chistoe of Lankovaya depression while magnetic characteristics are opposite indicating the different sedimentation regimes of both lakes (Pozhidaeva and Minyuk, 2023) (Fig.2).

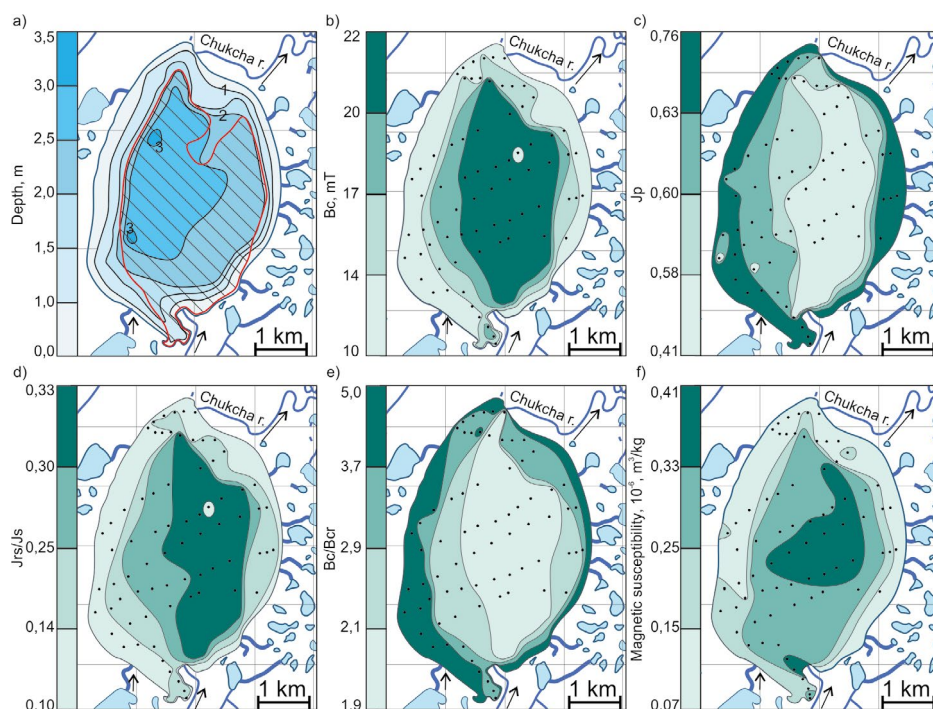


Fig.2. Bathymetric map (a), distribution of the rock magnetic characteristics (b-f) in the surface bottom sediments of lake Chukcha. The shaded area mart distribution of the silty sediments, the points indicate the sites of surface sampling.

Acknowledgements

The study was carried as a part of State Assignment № 121031700311-4.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Geologicheskaya karta [Geological map]. Sheet O-55-IV. Scale 1: 2000000. 1981. Korolkov V.G., Korolkova A.M. (in Russian)

Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. 1986. Paleomagnitny analiz [Paleomagnetic Analysis]. Kazan: KGU (in Russian)

Pozhidaeva D.K., Minyuk P.S. 2023. Sovremennyyi sedimentogenez oz.Chistoe (Severnoe Priohotie) [Modern sedimentation in the lake Chistoe (Northern coast of the Sea of Okhotsk)]. In Nauchnaya molodezh – Severo-Vostoku Rossii [Scientific youth for the North-East of Russia]: Materialy IX mezhhregional'noi konferentsii molodykh uchenykh [Proceedings of the IX Interregional Conference of Young Scientists] (Magadan, December 1-2, 2022) 9: P. 22–26 (in Russian)

Day R., Fuller M., Schmidt V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13: 260–267. DOI:[10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)

Современное осадконакопление в озерах Чукча и Безымянка, Охотское побережье

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПожидаева Д.К.^{1,2*}, Минюк П.С.¹¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая д.16, г. Магадан, 685000, Россия²Казанский федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, ул. Кремлевская, 4/5, г. Казань, 420008, Россия

АННОТАЦИЯ. Озера Чукча (59°31'56» с.ш., 147° 23'07» в.д.) и Безымянка (59°29'56» с.ш., 147°21'02» в.д.) расположены в Кава-Тауйской впадине, на северном побережье Охотского моря. Мощность отложений, их магнитные свойства, скорость седиментации в обоих озерах различны. Петромагнитные характеристики поверхностных донных отложений контролируются гранулометрическим составом. Прибрежные песчаные отложения имеют низкие величины MB, Jrs, Js и высокие значения Jr, в то время как ил обладает противоположными характеристиками. Магнитные минералы из ила представлены однодоменными частицами с низким содержанием парамагнитной компоненты. Магнитные свойства ила могут быть связаны с аутигенными (хемогенными) сульфидами и оксидами железа.

Ключевые слова: голоцен, магнетизм горных пород, озерные отложения

Для цитирования: Пожидаева Д.К., Минюк П.С. Современное осадконакопление в озерах Чукча и Безымянка, Охотское побережье // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 538-543. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-538

1. Введение

На побережье Охотского моря расположено большое количество озер. Среди них выделяются прибрежные озера, отшнурованные от моря (Соленое, Глухое) и озера, расположенные в кайнозойских впадинах, таких как Ланковская, Кава-Тауйская, Гижигинская. Эти озера отличаются от многих ледниковых горных озер возрастом, составом отложений и скоростью седиментации. Мощность голоценовых озерных отложений впадин достигает 10 м, что обеспечивает высокую разрешающую летопись изменения природной среды. Отложения этих озер характеризуются высокими значениями магнитной восприимчивости, низким содержанием органического вещества и стабильной однокомпонентной намагниченностью. В этом отношении они являются благоприятным объектом для изучения тонкой структуры геомагнитного поля. Осадкообразование в озерах отражает совокупность процессов и условий седиментации как в разных частях водоема, так и на водосборе. Изучение современной седиментации способствует лучшему пониманию процессов осадконакопления прошлого (Рис.1).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dashapozhidaeva01@gmail.com (Д.К. Пожидаева)

Поступила: 15 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

2. Материалы и методы

Озера Чукча (59°31'11" с.ш.; 147°22'45" в.д.) и Безымянка (59°29' 45" с.ш.; 147°20'32" в.д.) расположены в Кава-Тауйской кайнозойской депрессии. На востоке и юге озер находятся озерно-болотные отложения голоценового возраста, на западе и севере – неогеновые пески, галька, алевролиты. Южные ручьи, впадающие в озера, размывают меловые вулканогенные породы (Геологическая..., 1981). Река Чукча вытекает из северной части одноименного озера. Озеро Чукча имеет длину 5.7 км, ширину 3.5 км. Максимальная глубина воды составляет 3 м, абсолютная отметка воды - 40 м. Оз. Безымянка имеет длину 2.3 км и ширину 1 км. Глубина воды не превышает 2.5 м.

По две колонки керн взяты из оз. Чукча (Чк-1 длиной 505 см и Чк-2 длиной 483 см) и из оз. Безымянка (Чб-1 длиной 936 см и Чб-2 длиной 874 см) в центральных частях бассейнов. Поверхностные донные пробы (73 образца) отобраны по профилям на всей площади озера Чукча.

Измерения магнитной восприимчивости (MB) осадков выполнено на многофункциональном кап-паметре MFK 1FA. Термомагнитный анализ (ТМА)

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



проводили на MFK 1FA с термоприставкой CS3 (AGICO Ltd.) и магнитных весах (Буров и др., 1986). Гистерезисные характеристики, включая остаточную намагниченность насыщения (J_{rs}), намагниченность насыщения (J_s), индуктивную намагниченность (J_i), коэрцитивную силу (B_c), остаточную коэрцитивную силу (B_{cr}) измерены на автоматическом коэрцитиметре J-meter (Буров и др., 1986). Радиоуглеродный анализ выполнен в СВКНИИ ДВО РАН и Тайваньском университете. Определение породообразующих элементов проводили на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer (Германия). Относительное содержание органического вещества оценивали по потерям при прокаливании (ППП) после нагрева образцов до 550°C.

3. Результаты и обсуждение

Литологические особенности донных отложений в обоих озерах одинаковы. В верхней части колонок преобладает массивный алеврит, в нижней – алеврит с неясной тонкой слоистостью. В осадках встречаются остатки водных и наземных растений, а также вивианит. В забое скважин оз. Безымянка осадки представлены илом, песком и хорошо окатанными обломками древесины с возрастом 27 тыс. лет. Предполагается, что озеро образовалось на аллювиальной равнинной поверхности. Две радиоуглеродные даты (AMS), полученные по осадкам скв. Чб-1 (1661 ± 70 и 3001 ± 70 лет), свидетельствуют о голоценовом возрасте оз. Безымянка. В спорово-пыльцевых спектрах из нижней части озерных отложений преобладают древесно-кустарниковые таксоны *Betula*, *Alnus*, *Pinus* subgen. *Haploxyylon*, что указывает на теплый климат.

По магнитной восприимчивости наблюдается хорошая корреляция осадков скважин в каждом озере, однако сопоставление разрезов между озерами по этому параметру затруднительно, что указывает на различные условия седиментации. Отложения оз.Чукча характеризуются более высокими значениями M_B . Состав отложений в источниках сноса, содержание биогенного кремнезема и органического вещества в озерных отложениях определяют величины магнитной восприимчивости, с одной стороны, и хемогенное (аутигенное) образование магнитных минералов - с другой.

Содержание SiO_2 и ППП постепенно увеличивается снизу-вверх в колонке Чб 1, что



Рис.1. Расположение исследуемых объектов.

свидетельствует о повышении биопродуктивности озера. Судя по отношениям J_{rs}/J_s и B_{cr}/B_c (Day et al., 1977) магнитные частицы в верхней части разреза однодоменные. Осадки озера Чукча и Безымянка содержат детальные вековые вариации геомагнитного поля.

Поверхностные донные отложения оз. Чукча неоднородны по гранулометрическому составу. Пляжи и отмели состоят преимущественно из песка, а в глубокой центральной части озера преобладают ил и глина. Зона мелководья шире в западной части озера, что свидетельствует о более высокой интенсивности абразии. Магнитные свойства поверхностных отложений определяются гранулометрией. В мелководных песчаных отложениях наблюдаются низкие величины M_S , J_{rs} , J_s и высокие значения J_r . Пляжный песок, отсортированный волнами и содержащий видимые тяжелые минералы, характеризуется высокой M_B . Магнитные минералы ила центральной части озера однодоменные с низким содержанием парамагнитной компоненты и могут быть связаны с аутигенными (хемогенными) сульфидами и оксидами железа.

Пространственное распределение тонких осадков на дне оз.Чукча аналогично озеру Чистое Ланковой впадины, однако магнитные характеристики противоположны, что указывает на разные режимы седиментации обоих озерах (Пожидаева и Минюк, 2023) (Рис.2).

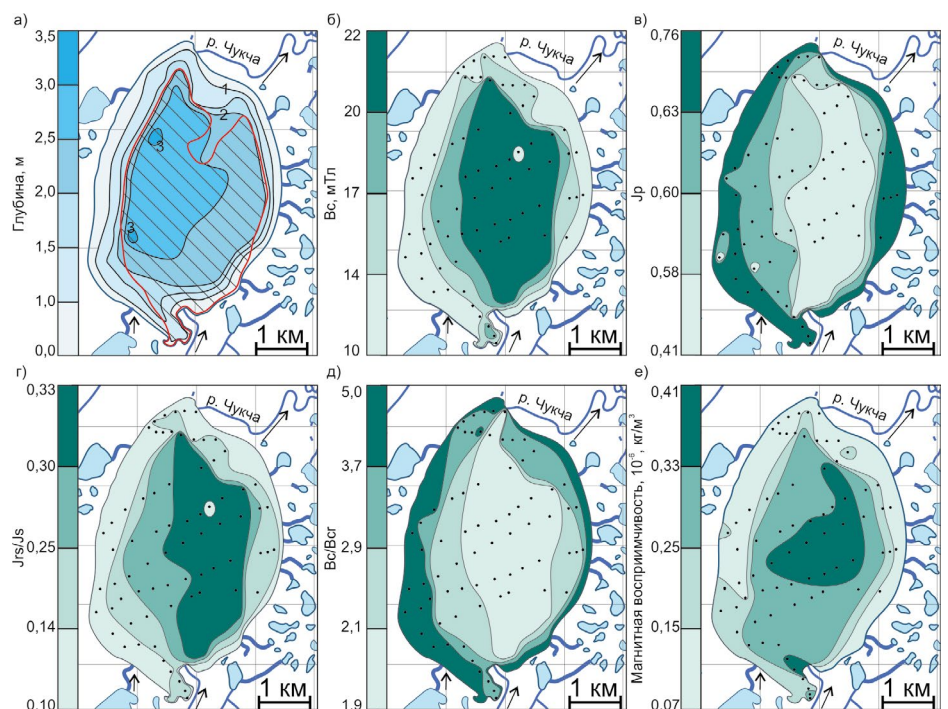


Рис.2. Батиметрическая карта (а), карты распределения петромагнитных характеристик (б-е) по поверхностным донным пробам оз. Чукча. Заштрихованный участок – область распространения илистых осадков, точки – места отбора поверхностных проб.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках Государственного задания № 121031700311-4.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

Геологическая карта. Лист О-55-IV. Масштаб 1: 2000000. 1981. Корольков В.Г., Королькова А.М.

Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. 1986. Палеомагнитный анализ. Казань: КГУ.

Пожидаева Д.К., Минюк П.С. 2023. Современный седиментогенез оз. Чистое (Северное Приохотье). Научная молодёжь - Северо-Востоку России: материалы IX межрегиональной конференции молодых учёных (Магадан, 1-2 декабря 2022) 9: p. 22-26.

Day R., Fuller M., Schmidt V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 13: 260–267. DOI:[10.1016/0031-9201\(77\)90108-X](https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90108-X)

Quantitative methods for reconstruction of the Holocene paleoclimatic characteristics and vegetation changes based on palynological data from lake and peat sediments



Novenko E.Yu.^{1*}, Andreev R.A.^{1,2}

¹ Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 29, Moscow, 119017, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of a methodological study of the quantitative reconstruction of paleoclimatic characteristics (mean January and July temperatures, mean annual temperature and precipitation) and forest cover within a 20 km radius of the study site using palynological data from lake and peat sediments. The following quantitative methods have been tested: the best modern analog technique, transfer functions as weighted averaging, weighted averaging partial least square, and the Random Forest method, a meta estimator that fits a number of decision tree classifiers on various sub-samples of the dataset. A database of subfossil pollen assemblages for northern central Siberia (north of 60°C) was used as a training data set for model construction, containing 174 pollen assemblages, climatic characteristics for the sampling area, and calculations of forest cover based on remote sensing data. Leave-one-out cross validation was applied for testing of the methods. The results showed that all models had the highest coefficients of determination (R^2), the smallest errors and the lowest uncertainty for the reconstruction of the mean July temperature. The developed methods were applied to two key sites in Central Siberia, located in the vicinity of Igarka and the settlement of Tura (Krasnoyarsk Region). The results obtained showed similar trends in the changes in palaeoclimatic characteristics reconstructed by different methods, but a rather large variation in temperature and precipitation values at some time intervals.

Keywords: paleoclimate, the best modern analog technique, transfer functions, Random Forest method, Central Siberia

For citation: Novenko E.Yu., Andreev R.A. Quantitative methods for reconstruction of the Holocene paleoclimatic characteristics and vegetation changes based on palynological data from lake and peat sediments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 544-549. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-544](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-544)

1. Introduction

Quantitative vegetation and climate reconstructions are an important part of the retrospective analysis of the natural environment. Data derived from diatom, chironomid and isotope geochemical analyses of palaeoarchives from marshes and lakes were used to calculate quantitative parameters of the paleoenvironment. Reconstructions of climate and vegetation cover based on the results of pollen analysis are commonly used. However, as numerous studies have shown, the use of a data base consisting of palynological assemblages from contrasting geographical regions negatively affects the accuracy of quantitative reconstructions. A number of researchers concluded that the

dataset should be regionally constrained and that the methods should be tested on a regional database.

The objectives of the present study are to develop and test quantitative methods for paleoclimate reconstructions from pollen data of mean July and January temperatures, mean annual temperature and precipitation, and total forest coverage within a 20 km radius of the study site for the area of northern Central Siberia.

2. Material and methods

The following quantitative reconstruction methods have been tested for reconstructing forest cover and palaeoclimate: the Best Modern Analogue Technique

*Corresponding author.

E-mail address: lenanov@mail.ru (E.Yu. Novenko)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



(MAT), based on a statistical search for fossil pollen assemblages of their closest modern analogues; Weighted Averaging (WA), based on the construction of a transfer function based on the relationship between the ecological requirements of taxa and a climatic conditions; Weighted Averaging Partial Least Square (WAPLS), which also constructs a transfer function but uses a different statistical method; and Random Forest (RF), which builds models based on decision trees. Table 1 shows the parameters of the models used. Calculations of climatic characteristics and testing of methods by leave-one-out validation are implemented in the form of scripts in the R programming language. The analogue package was used for the MAT (Simpson and Oksanen, 2021), for WA and WAPLS – rioja (Juggins, 2023), the RF package randomForest (Liaw and Wiener, 2003). A database of subfossil pollen assemblages for the north of Central Siberia (north of 60°N), which contains 174 sites, was used as a training dataset for constructing models. The database contains information on climatic characteristics in the form of a table for each surface sampling point (the mean temperature in July, January, the mean annual temperature, °C; average annual precipitation, mm; forest coverage within a radius of 20 km, %). The pollen assemblages of 142 surface samples were taken from the Eurasian Modern Pollen Database-2 (Davis et al., 2020). In addition, the results of earlier palynological analyses of surface samples from the Igarka, Tura, Turukhansk and Vanavara regions (32 spectra) were used. The sampling area of the surface samples contained in the database covers the vicinity of Norilsk and the Putorana plateau, the North Siberian Lowland in the Khatanga region and the Central Yakutia. Climate indicators (for the last 30 years) for these areas were taken from the database of the All-Russia Research Institute of Hydrometeorological Information - World Data Center (RIHMI-WDC) for weather stations.

The current forest coverage within a radius of 20 km around the surface sampling point is determined based on data from the WorldCover 2020 project (ESA WorldCover project, 2021). The data represent layers of landscape cover for almost the entire land area with a spatial resolution of 10 m, classified based on satellite imagery Sentinel-1 and Sentinel-2. An independent statistical and visual assessment of World Cover project

shows the high accuracy of the classification (82.1% for Asia, ESA WorldCover project, 2021). The determination of forest cover within a radius of 20 km around the surface sampling site was performed in the QGIS software version 3.16, as well as using an additional program in the R language.

The tests of the accuracy of the reconstruction methods (standard error of prediction, RMSEP) and the coefficient of determination (R^2), as well as the selection of the most appropriate parameters of the models, were carried out by leave-one-out cross validation. The results of the verification are shown in Table 1.

3. Results and discussion

According to obtained results, MAT was shown to have the highest cross-validated reconstruction accuracy, outperforming the other methods for both indicators and all parameters. The smallest errors and the smallest variance, as well as the best coefficient of determination, were achieved for the July temperature for all models. Reconstructions of the mean annual temperature show a relatively good accuracy. Annual precipitation is worse determined than the other indicators. For the calculation of T_{Jan} and T_{ann} , as well as P_{ann} , MAT and RF give better results than WA and WAPLS. The coefficient of determination (R^2) for all parameters in MAT and RF show a high proportion of the explained variance (from 74 to 87% respectively).

However, the strong difference with other models for T_{Jan} , T_{ann} and P_{ann} raises doubts about the reliability of these estimates, which requires further tests. In general, the leave-one-out cross-validation results show the ability of the models used to reliably reconstruct trends in the dynamics of the mean July temperature and forest coverage, and somewhat less reliably for T_{ann} and other characteristics.

The tested four methods of reconstruction of climatic characteristics and forest coverage were used to analyze the Holocene changes in vegetation and climate in Central Siberia. The calculations are based on fossil pollen assemblages from lacustrine and peat sediments from two peatlands located near the town of Igarka (Novenko et al., 2023) and the settlement of Tura. The results obtained showed similar trends in the changes

Table 1. Results of leave-one-out cross validation

Methods	Climatic characteristics									
	RMSEP					R^2				
	T_{Jul}	T_{Jan}	T_{ann}	P_{ann}	Forest cover	T_{Jul}	T_{Jan}	T_{ann}	P_{ann}	Forest cover
Best Modern Analogue Technique (MAT)	1,09	2,18	0,92	49,8	0,18	0,84	0,78	0,87	0,81	0,68
Weighted Averaging (WA)	1,24	3,33	1,43	79,2	0,18	0,78	0,48	0,68	0,47	0,66
Weighted Averaging Partial Least Square (WAPLS)	1,15	3,17	1,5	86,3	0,18	0,81	0,53	0,65	0,39	0,66
Random Forest (RF)	1,24	2,34	1,06	51,4	0,2	0,78	0,74	0,82	0,78	0,61

in paleoclimatic characteristics reconstructed by different methods, but a rather large variation in temperature and precipitation values at some time intervals.

With the exception of individual peaks, the best correspondence between the various methods was found for the reconstruction of the mean July temperature in, the largest range of values for precipitation. To refine the reconstruction, it is necessary to expand the dataset of surface pollen assemblages.

Acknowledgements

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests.

References

Davis B.A.S., Chevalier M., Sommer P. et al. 2020. The Eurasian Modern Pollen Database (EMPD), version 2. *Earth System Science Data* 12 (4.): 2423–2445.

ESA WorldCover project. 2021. [Internet resource]. Access: <https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/> (date of access 2.02.2022)

Juggins S. 2023. rioja: Analysis of Quaternary Science Data. R package version 1.0-6. [Internet resource]. Access: <https://cran.r-project.org/package=rioja> (data of access 2.10.2023)

Liaw A., Wiener M. 2003. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2/3: 18-22. [Internet resource]. Access: <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>. (data of access 5.06.2023)

Novenko E., Rudenko O., Mazei N. et al. 2023. Effects of Climate Change and Fire on the Middle and Late Holocene Forest History in Yenisei Siberia. *Forests* 14: 2321. [10.3390/f14122321](https://doi.org/10.3390/f14122321)

Simpson G.L., Oksanen J. 2021. analogue: Analogue and weighted averaging methods for palaeoecology. R package version 0.17-6, [Internet resource]. Access: <https://cran.r-project.org/package=analogue> (data of access 12.09.2023)

WorldCover Product Validation Report | V2.0. // ESA WorldCover. 2022. [Internet resource]. Access: https://worldcover2021.esa.int/data/docs/WorldCover_PVR_V2.0.pdf (data of access 7.10.2023)

Количественные методы реконструкций палеоклиматических характеристик и изменений растительности в голоцене по палинологическим данным из озерных и болотных отложений

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНовенко Е.Ю.^{1*}, Андреев Р.А.^{1,2}¹ Институт географии РАН, Старомонетный переулок, д. 29, Москва, 119017, Россия² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д.1, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены результаты разработки количественных методов реконструкции палеоклиматических характеристик (средние температуры января и июля, среднегодовая температура, среднегодовые осадки) и доли лесопокрытой площади в радиусе 20 км (лесистости) по палинологическим данным из озерных и болотных отложений. Протестированы следующие методы количественных реконструкций: метод лучших аналогов, взвешенная нелинейная регрессия, регрессия методом наименьших частичных квадратов, и метод случайного леса (Random Forest), строящий модели на основе деревьев принятия решений. В качестве тренировочной выборки для построения моделей использована база данных субфоссильных спорово-пыльцевых спектров для севера Средней Сибири (севернее 60° с.ш.), которая содержит 174 точки, климатические характеристики для территории отбора проб и расчеты лесистости по данным дистанционного зондирования Земли. Для всех моделей наименьшие ошибки и небольшой их разброс, а также наивысшие коэффициенты детерминации получены для реконструкции средней температуры июля. Разработанные методики были применены для двух ключевых участков в Средней Сибири, расположенных в окрестностях г. Игарка и пос. Тура (Красноярский край). Полученные результаты показали сходные тренды изменений палеоклиматических характеристик, реконструированных различными методами, но довольно большой разброс значений температур и осадков на отдельных хроносрезках.

Ключевые слова: палеоклимат, лесистость, метод лучших аналогов, трансферная функция, метод случайного леса, Средняя Сибирь

Для цитирования: Новенко Е.Ю., Андреев Р.А. Количественные методы реконструкций палеоклиматических характеристик и изменений растительности в голоцене по палинологическим данным из озерных и болотных отложений // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 544-549. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-544

1. Введение

Количественные реконструкции характеристик растительности и климата – важное направление в ретроспективном анализе развития компонентов природной среды. Для расчёта количественных параметров среды в прошлом используют данные диатомового, хирономидного, изотопно-геохимического анализов палеоархивов болот и озёр. Широко распространены реконструкции климата и растительного покрова по данным спорово-пыльцевого анализа. Но как показали многочисленные исследования, использование палинологических спектров

из контрастных физико-географических регионов отрицательно влияет на точность количественных реконструкций. Это обусловлено изменчивостью состава спектров, приуроченных к различающимся зонально и секторно территориям. Исследователи приходят к выводу, что выборка должна быть регионально ограничена, а затем протестирована на региональной базе данных. Цель представленного исследования состояла в разработке количественных методов реконструкции палеоклиматических характеристик (средние температуры января и июля, среднегодовая температура, среднегодовые осадки) и доли лесопокрытой площади в радиусе

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lenanov@mail.ru (Е.Ю. Новенко)

Поступила: 11 июня 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



20 км (лесистости) по палинологическим данным для территории севера Средней Сибири.

2. Материалы и методы

Для реконструкции лесистости и палеоклимата протестированы следующие методы количественных реконструкций: метод лучших аналогов (Modern Analogue Technique, MAT), основанный на математическом поиске для ископаемых спектров наиболее близких современных аналогов; взвешенная нелинейная регрессия (weighted averaging, WA), основанная на построении трансферной функции из расчёта экологических приуроченностей таксонов к климатическому показателю; регрессия методом наименьших частичных квадратов (weighted averaging partial least square, WAPLS), также строящая трансферную функцию, но с помощью иной статистического метода; а также метод случайного леса (Random Forest, RF), строящий модели на основе деревьев принятия решений. В таблице 1 приведены параметры использованных моделей.

Расчеты и тестирование методов путем перекрёстной проверки реализованы в виде скриптов на языке программирования R. Для MAT использован пакет analogue (Simpson and Oksanen, 2021), для WA и WAPLS – rioja (Juggins, 2023), RF – пакет randomForest (Liaw and Wiener, 2003).

В качестве тренировочной выборки для построения моделей использована база данных субфоссильных спорово-пыльцевых спектров для севера Средней Сибири (севернее 60° с.ш.), которая содержит 174 точки. В базе данных в виде таблицы для каждой точки отбора поверхностных проб приведена информация о климатических характеристиках (средняя температура июля, января, среднегодовая температура, °C; среднегодовые осадки, мм; лесистость в радиусе 20 км, %). Спорово-пыльцевые спектры 142 поверхностных проб взяты из базы данных Eurasian Modern Pollen Database-2 [Davis et al., 2020]. Помимо них использованы результаты палинологического анализа поверхностных проб из районов Игарки, Туры, Туруханска и Ванавары (32 спектра), полученные нами ранее. Территория

отбора поверхностных проб, содержащихся в базе данных, охватывает окрестности Норильска и плато Путорана, Северосибирскую низменность в районе Хатанги и Центральнуюкутскую низменность. Климатические показатели (за последние 30 лет) для данных точек взяты из базы данных МЦД-ВНИИГМИ для метеостанций Игарка, Тура, Туруханск и Ванавара.

Современная лесопокрытая площадь в радиусе 20 км вокруг точки отбора поверхностных проб определена на основе данных проекта WorldCover 2020 (ESA WorldCover project, 2021). Данные представляют собой слои ландшафтного покрова для территории почти всей суши с пространственным разрешением 10 м, классифицированные на основе съемки со спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Независимая статистическая и визуальная оценка WorldCover показывает высокую точность проведённой классификации (82,1% для Азии, ESA WorldCover project, 2021). Определение лесистости в радиусе 20 км вокруг места отбора поверхностных проб выполнено в ПО «QGIS» версии 3.16, а также с помощью вспомогательной программы на языке R.

Оценка точности методов реконструкции (расчёт среднеквадратической ошибки предсказания, RMSEP) и их объясняющей способности (коэффициент детерминации R^2), а также подбор наиболее подходящих параметров моделей произведены методом перекрёстной проверки с исключением. Результаты проверки приведены в таблице 1.

3. Результаты и их обсуждение

Наивысшие результаты при перекрёстной проверке показал MAT, имеющий преимущество перед другими методами по обоим показателям и для всех параметров. Для всех моделей наименьшие ошибки и небольшой их разброс, а также наивысшие коэффициенты детерминации получены для $T_{июл}$. Реконструкции среднегодовой температуры показали относительно средний результат. Годовые осадки $P_{год}$ реконструированы хуже остальных показателей. Лесистость рассчитана всеми моделями с примерно одинаковой точностью. Для

Таблица 1. Результаты перекрёстной проверки с исключением (leave-one-out cross validation)

Метод	Параметры									
	RMSEP					R2				
	$T_{июл}$	$T_{январь}$	$T_{ср.год}$	$P_{год}$	Лесистость	$T_{июл}$	$T_{январь}$	$T_{ср.год}$	$P_{год}$	Лесистость
Метод лучших аналогов (MAT)	1,09	2,18	0,92	49,8	0,18	0,84	0,78	0,87	0,81	0,68
Взвешенная нелинейная регрессия (WA)	1,24	3,33	1,43	79,2	0,18	0,78	0,48	0,68	0,47	0,66
Регрессия методом наименьших частичных квадратов (WAPLS)	1,15	3,17	1,5	86,3	0,18	0,81	0,53	0,65	0,39	0,66
Случайный лес (RF)	1,24	2,34	1,06	51,4	0,2	0,78	0,74	0,82	0,78	0,61

показателей $T_{\text{янв.}}$ и $T_{\text{ср. год}}$, а также $R_{\text{год}}$ MAT и RF показывают результаты лучше, чем WA и WAPLS. Коэффициенты детерминации для всех параметров у MAT и RF показывают высокую долю объяснённой дисперсии (от 74 до 87%). Однако сильная разница с другими моделями для $T_{\text{янв.}}$, $T_{\text{ср. год}}$ и $R_{\text{год}}$ вызывает сомнения в достоверности данных оценок, что требует дальнейших тестов. В целом, результаты проверки отражают способность использованных моделей надёжно отражать тренды динамики средней температуры июля и лесистости и несколько менее надёжно для $T_{\text{ср. год}}$.

Протестированные 4 метода реконструкции климатических характеристик и лесистости применены для анализа изменений растительности и климата в Средней Сибири в голоцене. Расчеты приведены по ископаемым спорово-пыльцевым спектрам из разрезов торфяных болот: крупнобугристое болото в районе Игарки (Novenko et al., 2023) и болото Горное (Тура). Полученные результаты показали сходные тренды изменений палеоклиматических характеристик, но довольно большой разброс значений температур и осадков на отдельных хроносрезях. За исключением, отдельных пиков, наилучшее соответствие между различными методами выявлено для средней температуры июля, самый большой разброс значений – для осадков. Для уточнения реконструкции необходимо расширять базу поверхностных спорово-пыльцевых спектров.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Davis B.A.S, Chevalier M., Sommer P. et al. 2020. The Eurasian Modern Pollen Database (EMPD), version 2. *Earth System Science Data* 12 (4.): 2423–2445.

ESA WorldCover project. 2021. [Internet resource]. Access: <https://viewer.esa-worldcover.org/worldcover/> (дата обращения 2.02.2022)

Juggins S. 2023. rioja: Analysis of Quaternary Science Data. R package version 1.0-6. [Internet resource]. Access: <https://cran.r-project.org/package=rioja> (дата обращения 2.10.2023)

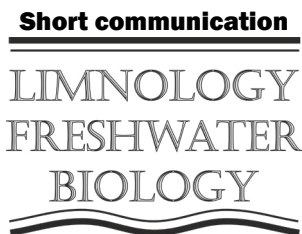
Liaw A., Wiener M. 2003. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2/3: 18-22. [Internet resource]. Access: <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>. (дата обращения 5.06.2023)

Novenko E., Rudenko O., Mazei N. et al. 2023. Effects of Climate Change and Fire on the Middle and Late Holocene Forest History in Yenisei Siberia. *Forests* 14: 2321. [10.3390/f14122321](https://doi.org/10.3390/f14122321)

Simpson G.L., Oksanen J. 2021. analogue: Analogue and weighted averaging methods for palaeoecology. R package version 0.17-6, [Internet resource]. Access: <https://cran.r-project.org/package=analogue> (дата обращения 12.09.2023)

WorldCover Product Validation Report | V2.0. // ESA WorldCover. 2022. [Internet resource]. Access: https://worldcover2021.esa.int/data/docs/WorldCover_PVR_V2.0.pdf (дата обращения 7.10.2023)

Late Pleistocene and Holocene sedimentation in the glacial Lake Sosednee, Magadan region



Pozhidaeva D.K.^{1, 2*}, Minyuk P.S.¹

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo FEB RAS, 16 Portovaya St., Magadan, 685000, Russia

²Kazan Federal University, Institute of Geology and Petroleum Technologies, 4/5 Kremlevskaya st., Kazan 420008, Russia

ABSTRACT. Lake Sosednee is located in the Yagodninsky district of the Magadan region. It was formed in the Late Pleistocene around 22,500 cal. years ago. The rock magnetic, geochemical, palynological, and mineralogical characteristics of the sediments of four cores, as well as moraine, and various grain size fractions of the hillslope sediments were studied. It has been established that the geochemical and rock magnetic properties of sediments from lake Sosednee reflect different sedimentation conditions, changing from the cold climate of the Late Pleistocene to the warm climate of the Holocene. In the lower part of the core, authigenic (hemogenic) formation of iron sulfides, including magnetic ones, was revealed. According to the rock magnetic and geochemical data, the Younger Dryas was identified, the end of which corresponds to the Pleistocene–Holocene boundary.

Keywords: Holocene, Pleistocene, lake sediments, geochemistry, rock magnetism

For citation: Pozhidaeva D.K., Minyuk P.S. Late Pleistocene and Holocene sedimentation in the glacial Lake Sosednee, Magadan region // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 550-555. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-550

1. Introduction

Glacial lakes are widespread in the Magadan region. The lakes were formed at the end of the Pleistocene- the beginning of the Holocene. Their distinctive features are the small thickness of the sedimentary cover, the dominance of biogenic sedimentation in the Holocene and terrigenous in the Late Pleistocene, high variations of rock magnetic, geochemical and lithological parameters of sediments. These lakes are promising objects for studying sedimentation in cold, warm and transitional climates.

2. Materials and methods

Lake Sosednee (62°03'29.62" N, 149°31'21.18" E) is located in the Yagodninsky district of the Magadan region, 600 m from the southwestern shore of Lake Jack-London, at the mouth of the Nevedomy stream, flowing through trough valleys from the Late Jurassic granite massif. The length of the lake is 1400 m, width is 600 m. The bottom topography is complex, in the western part of the lake the depth reaches 13.4 m, in the eastern part the average depth is 2-6 meters.

Four sediment cores were taken in the central

parts of the lake at the water depth 4-6 m (SD-1, 424 cm long, SD-2, 64 cm long, SD-3, 411 cm long and SD-4, 284 cm long). A bulk sample from hillslope sediments was taken on the shore of the lake.

The slope sample was divided by wet sieving into the grain-size fractions >2500, 2500–500, 500–250, 250–140, 140–100, 100–63, 63–40, and <40 μm. The last fraction was stirred and precipitated material was studied after 20 min (20 μm fraction), 24 h (5 μm fraction). A moraine was sampled on the right side of the Nevedomy stream.

Magnetic susceptibility (MS) of sediments were measured on MFK 1FA kappabridge

(AGICO Ltd.). Thermomagnetic analysis (TMA) was performed using MFK1-FA equipped with a CS-3 high temperature furnace (AGICO Ltd.) and a Curie express balance (Burov et al., 1986). Hysteresis parameters including saturation magnetization (Js), induced magnetization (Ji), saturation remanence (Jrs), coercive force (Bc) and remanence coercivity (Bcr), were measured using an automatic coercive spectrometer (Burov et al., 1986). Radiocarbon analysis (AMS) was performed at the Taiwan University. An age-depth model was then constructed using Bacon software. Major elements were determined using an S4 Pioneer X-ray fluo-

*Corresponding author.

E-mail address: dashapozhidaeva01@gmail.com (D.K. Pozhidaeva)

Received: June 02, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



rescence spectrometer (Germany). The relative content of organic material was estimated using loss on ignition (LOI) after heating the samples to 550°C (2 hours).

3. Results and discussion

The lake sediment cores consist of three units, divided according to lithological characteristics: unit 1 - olive-gray massive organogenic silt with a layer of volcanic tephra; unit 2 - unclear-layered brownish-gray silt; unit 3 - bluish-gray thin-layered silt. The boundary between units 1 and 2 corresponds to the Pleistocene-Holocene boundary (11,700 cal. years), while the boundary between units 2 and 3 coincides with the MIS1 – MIS2 boundary (14,700 cal. years).

The sediments of unit 3 are characterized by an increased content of Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , low SiO_2 values and the $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ratio. The $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ ratio is used to determine the relative content of biogenic silica in lake sediments (Tanaka et al., 2007). The sediments of unit 3 show the high values of MS, Js, Jrs, Bc, Bcr, Jrs/Js and low values of Bcr/Bc, Jp. According to these indicators, the sediments of the unit 3 are comparable to the fine grain size fractions of slope deposits. The Jrs/Js and Bcr/Bc ratios indicate the presence of magnetic particles of a predominantly single-domain state. The relative content of iron sulfides determined in smear slides is high. They are concentrated at 6 levels and are distinguished by high MS values (Fig.1).

Unit 2 is transitional. It has increased the content of biogenic silica and organic matter, which has had an impact on all geochemical and rock magnetic indicators. The percentage of the trees and shrubs taxa sharply increased in the pollen spectra. According to rock magnetic characteristics, the interval 12900 – 11700 cal. years is clearly distinguished.

Unit 1 consist of organic sediments of the Holocene. At this time, the bioproductivity of the basin

becomes maximum, tree and shrubs taxa dominates in the pollen spectra, and rock magnetic and geochemical characteristics change sharply at the lower boundary. Due to dilution of the sediment with biogenic silica, the content of other elements is low, and the content of P_2O_5 in the unit increases.

Terrigenous sedimentation dominated in the lake during the Late Pleistocene. The ice cover on the lake caused the emergence of anoxic conditions in the basin, creating favorable conditions for the formation of authigenic iron sulfides of the pyrite, greigite and pyrrhotite composition. To determine the redox conditions, the $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ ratios (Wersin et al., 1991) and V/Cr (Jones and Manning, 1994) were used (Fig. 1). According to palynological data, grassy vegetation dominated in the vicinity of the lake, which is confirmed by data from previous studies (Lozhkin et al., 1995). A noticeable warming of the climate began around 14700 cal. years ago. It has affected the terrestrial and aquatic components of the environment. Intensive accumulation of biogenic silica and organic matter affected the magnetic-geochemical parameters of the sediments, reducing the content of elements and decreasing the values of MS, Js, Jrs. The surrounding area of the lake was dominated by forest vegetation. The multi-scale variations of biotic and abiotic parameters show that the climate and sedimentation conditions during the Holocene were not stable. Increased values of MS, Js, and Jrs indicate the input of detritus material in the lake. According to a set of data close to the characteristics of Pleistocene sediments, sediments lying in the upper part of unit 2 are distinguished. They formed 12900–11700 cal. years ago, which corresponds to the Young Dryas (YD.) (Fig.1). This event in the North-East is practically not distinguished by the pollen data. (for example, Kokorowski et al., 2008). Rock magnetic data can become a critical for identifying of this event.

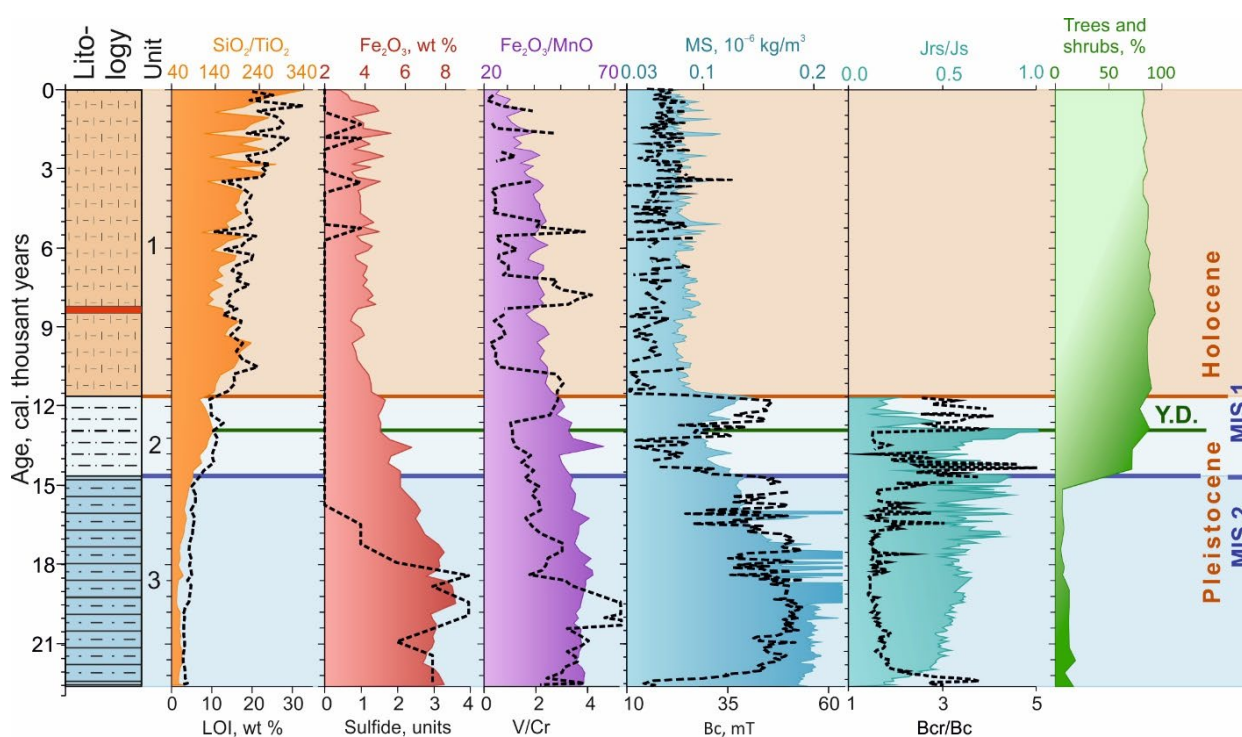


Fig.1. Main indicators of changes in sedimentation conditions and the natural environment of Lake Sosednee.

Acknowledgements

Field work and geochemical analyses were carried as a part of State Assignment № 121031700311-4. Petromagnetic, magnetic-mineralogical studies and data interpretation were funded by the subsidy allocated to the Kazan Federal University for the State Assignment of project № FZSM-2023-0023 in the sphere of scientific activities.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

References

Burov B.V., Nurgaliev D.K., Yasonov P.G. 1986. Paleomagnitny analiz [Paleomagnetic Analysis]. Kazan: KGU (in Russian).

Kokorowski H.D., Anderson P.M., Mock C.J. et al. 2008. A re-evaluation and spatial analysis of evidence for a Younger Dryas climatic reversal in Beringia. *Quaternary Science Reviews* 27: 1710–1722. DOI: [10.1016/j.quascirev.2008.06.010](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.010)

Lozhkin A.V., Anderson P.M., Eisner U.R. et al. 1995. Novye palinologicheskie i radiouglerodnye dannye ob evolutsii rastitel'nogo pokrova Zapadnoi Beringii v pozdnem Pleistocene i golotsene [New palynological and radiocarbon data on the evolution of the vegetation cover of Western Beringia in the Late Pleistocene and Holocene]. In *Evolutsiya klimata i rastitel'nosti Beringii v pozdnem kainozoe* [Evolution of climate and vegetation of Beringia in the Late Cenozoic]. Magadan: North-Eastern Scientific Research Institute FEB RAS (In Russian)

Jones B., Manning D. A. C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology* 111: 111–129. DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)

Tanaka K., Akagawa F., Yamamoto K. et al. 2007. Rare Earth Element Geochemistry of Lake Baikal Sediment: its Implication for Geochemical Response to Climate Change during the Last Glacial / Interglacial Transition. *Quaternary Science Reviews* 26: 1362–1368. DOI: [10.1016/j.quascirev.2007.02.004](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.02.004)

Wersin P., Hohener P., Giovanoli R. et al. 1991. Early diagenetic influences on iron transformations in a freshwater lake sediment. *Chemical Geology* 90: 233–252. DOI: [10.1016/0009-2541\(91\)90102-W](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90102-W)

Позднеплейстоценовое и голоценовое осадконакопление в ледниковом озере Соседнее, Магаданская область

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПожидаева Д.К.^{1, 2*}, Минюк П.С.¹¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая д.16, г. Магадан, 685000, Россия²Казанский федеральный университет, Институт геологии и нефтегазовых технологий, ул. Кремлевская, 4/5, г. Казань, 420008, Россия

АННОТАЦИЯ. Озеро Соседнее расположено в Ягоднинском районе Магаданской области. Оно образовано в позднем плейстоцене около 22500 кал. лет назад. Изучены магнитные, геохимические, палинологические и минералогические характеристики отложений из четырех скважин, а также морены и различных гранулометрических фракций делювиальных отложений. Установлено, что геохимические и петромагнитные характеристики осадков озера Соседнее отражают различные условия осадконакопления, сменяющиеся от холодных позднеплейстоценовых до обстановок теплого климата голоцена. В нижней части разрезов скважин выявлено аутигенное образование сульфидов железа, в том числе магнитных. По петромагнитным и геохимическим характеристикам выделен поздний дриас, по окончанию которого устанавливается граница плейстоцена и голоцена.

Ключевые слова: голоцен, плейстоцен, озерные осадки, геохимия, петромагнетизм

Для цитирования: Пожидаева Д.К., Минюк П.С. Позднеплейстоценовое и голоценовое осадконакопление в ледниковом озере Соседнее, Магаданская область // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 550-555. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-550

1. Введение

Озера ледникового происхождения широко распространены на территории Магаданской области. Время их образования – поздний плейстоцен-ранний голоцен. Их отличительными чертами являются небольшая мощность осадочного чехла, доминирование биогенного осадконакопления в голоцене и терригенного в позднем плейстоцене, разномасштабные вариации петромагнитных, геохимических и литологических параметров осадков. Эти озера являются перспективными объектами для исследования осадконакопления в холодных, теплых и переходных климатических условиях.

2. Материал и методы

Озеро Соседнее (62°03'29.62" с.ш., 149°31'21.18" в.д.) расположено в Ягоднинском районе Магаданской области, в 600 м от юго-западного берега озера Джека-Лондона, в устье ручья Неведомый, текущего по троговым долинам с позд-

неюрского гранитного массива. Длина озера 1400 м, ширина 600 м. Рельеф дна сложный, в западной части озера глубина достигает 13,4 м, в восточной части средняя глубина составляет 2-6 метров.

В центральной части озера пробурены 4 скважины на глубине 4-6 м (Сд-1, 424 см; Сд-2, 64 см; Сд-3, 411 см и Сд-4, 284 см). На берегу озера отобрана объемная проба делювия для комплексного изучения. Она разделена мокрым ситованием на гранулометрические фракции размером >2500, 2500–500, 500–250, 250–140, 140–100, 100–63, 63–40, и <40 мкм. Последнюю фракцию взмучивали и исследовали материал, выпавший в осадок сразу (фракция 20 мкм), через 24 часа (фракция ~5 мкм), а также неосажденную взвесь (фракция ~1 мкм). В правом борту ручья Неведомый опробована морена.

Измерения магнитной восприимчивости (МВ) осадков выполнено на многофункциональном каппаметре MFK 1FA с термоприставкой CS3 (AGICO Ltd.). Гистерезисные характеристики, включая остаточную намагниченность насыщения (Jrs), намаг-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dashapozhidaeva01@gmail.com (Д.К. Пожидаева)

Поступила: 02 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ниченность насыщения (Js), индуктивную намагниченность (Ji), коэрцитивную силу (Vc), остаточную коэрцитивную силу (Vcr) измерены на автоматическом коэрцитиметре J-meter (Буров и др., 1986). Радиоуглеродный анализ двух образцов микрочастиц органики проведен в Тайваньском университете. Возрастная модель для осадков скважины СД-1 построена с применением программы Васон. Химический состав осадков изучен методом рентгенофлуоресцентного анализа. Основные породообразующие элементы определены на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer, Германия. Относительное количество органического материала оценено по величине потери при прокаливании (ППП) после прогрева проб до 500°C (2 часа).

3. Результаты и обсуждение

В озерных осадках по литологическим признакам выделяется 3 слоя: слой 1 – оливково-серый массивный органогенный алеврит с прослоем вулканической тефры; слой 2 – неяснослоистый буровато-серый алеврит; слой 3 – сизо-серый тонкослоистый алеврит. Граница слоев 1 и 2 совпадает с границей плейстоцена и голоцена (11 700 кал. лет), а граница слоев 2 и 3 – с границей морских изотопных стадий (МИС) 1 и 2 (14700 кал. лет).

Слой 3 характеризуется повышенным содержанием Al_2O_3 , CaO, K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 , низкими значениями SiO_2 и отношения SiO_2/TiO_2 . Отношение SiO_2/TiO_2 использовано для определения относительного содержания биогенного кремнезема (Tanaka et al., 2007). Отложения слой 3 имеют высокие значения MB, Js, Jrs, Vc, Vcr, Jrs/Js и низкие значения Vcr/Vc, Jr. По этим показателям осадки слоя сопоставимы с тонкими фракциями склоновых отложений. Отношения Jrs/Js и Vcr/Vc указывает на присутствие магнитных частиц преимущественно

однодоменного состояния. Относительное содержание сульфидов железа, определенное в прозрачных слайдах, высокое. Они сконцентрированы на 6 уровнях и выделяются по высоким значениям MB (Рис.1).

Слой 2 является переходным. В нем увеличено содержание биогенного кремнезема и органики, что отразилось на всех геохимических и петромагнитных показателях. В спорово-пыльцевых спектрах резко возрастает количество пыльцы деревьев и кустарников. По петрофизическим характеристикам (Vc, Vcr/Vc, Jrs/Js) отчетливо выделяется интервал 12900 – 11700 кал. лет.

Слой 1 представлен органогенными осадками голоценового возраста. В это время биопродуктивность бассейна становится максимальной, в пыльцевых спектрах доминируют древесные таксоны, в основании слоя резко меняются петромагнитные и геохимические характеристики. Вследствие разбавления осадка биогенным кремнеземом содержание других элементов низкие. В слое увеличивается содержание P_2O_5 .

В позднем плейстоцене в озере доминировало терригенное осадконакопление. Ледовый покров на озере способствовал возникновению аноксидных обстановок в бассейне, создавая благоприятные условия для аутигенного образования сульфидов железа, пиритового, грейгитового и пирротинового состава. Для определения редокс обстановок использованы отношения Fe_2O_3/MnO (Wersin et al., 1991) и V/Cr (Jones and Manning, 1994) (Рис. 1). По палинологическим данным в окрестностях озера доминировала травянистая растительность, что подтверждается данными предыдущих исследований (Ложкин и др., 1995). Заметное потепление климата началось около 14700 кал. лет назад. Она отразилась на наземной и водной компонентах природной среды. Интенсивное накопление био-

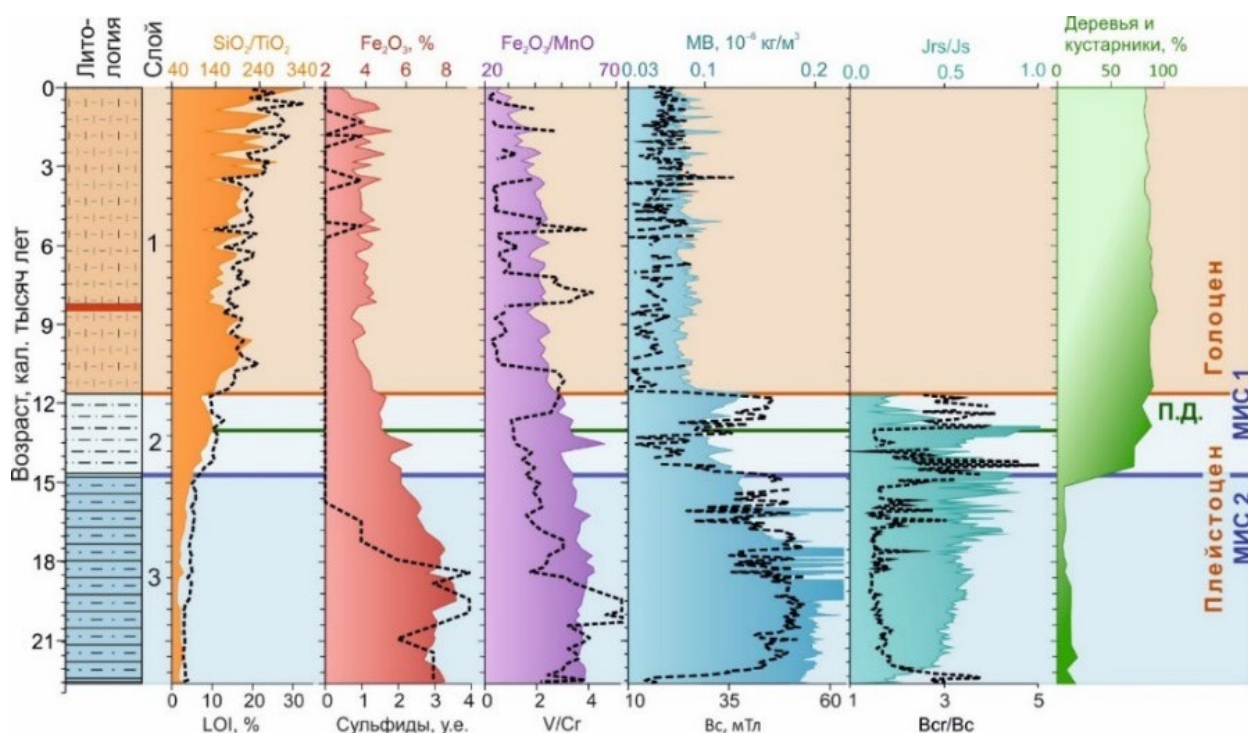


Рис.1. Главные индикаторы изменений условий осадконакопления и природной среды оз. Соседнее.

генного кремнезема и органики повлияло на магнито-геохимические параметры осадков, снижая концентрации элементов и уменьшая величины MB, Js, Jrs. В окрестностях озера господствовала лесная растительность. Разномасштабные вариации биотических и абиотических параметров показывают, что климат и условия седиментации в голоцене не были стабильными. Повышенные величины MB, Js, Jrs указывают на поступление детритового материала в бассейн. По комплексу данных, близких к характеристикам плейстоценовых отложений, выделяются осадки, залегающие в верхней части слоя 2. Они сформировались 12900 – 11700 кал. лет тому назад, что соответствует позднему дриасу (П.Д.) (Рис.1). Это событие на территории Северо-Востока практически не выделяется по спорово-пыльцевым данным (например, Kokorowski et al., 2008). Петромагнитные данные могут стать репером этого интервала.

Благодарности

Полевые работы и геохимические исследования выполнены в рамках Государственного задания № 121031700311-4. Петромагнитные, магнитно-минералогические исследования и интерпретация данных выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания проект № FZSM-2023-0023 в сфере научной деятельности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Буров Б.В., Нургалиев Д.К., Ясонов П.Г. 1986. Палеомагнитный анализ. Казань: КГУ.
- Ложкин А.В., Андерсон П.М., Эйсер У.Р. и др. 1995. Новые палинологические и радиоуглеродные данные об эволюции растительного покрова Западной Берингии в позднем плейстоцене и голоцене. Эволюция климата и растительности Берингии в позднем кайнозое. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 5–24
- Kokorowski H.D., Anderson P.M., Mock C.J. et al. 2008. A re-evaluation and spatial analysis of evidence for a Younger Dryas climatic reversal in Beringia. *Quaternary Science Reviews* 27: 1710–1722. DOI: [10.1016/j.quascirev.2008.06.010](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.06.010)
- Jones B., Manning D. A. C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology* 111: 111–129. DOI: [10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)
- Tanaka K., Akagawa F., Yamamoto K. et al. 2007. Rare Earth Element Geochemistry of Lake Baikal Sediment: its Implication for Geochemical Response to Climate Change during the Last Glacial / Interglacial Transition. *Quaternary Science Reviews* 26: 1362–1368. DOI: [10.1016/j.quascirev.2007.02.004](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.02.004)
- Wersin P., Hohener P., Giovanoli R. et al. 1991. Early diagenetic influences on iron transformations in a freshwater lake sediment. *Chemical Geology* 90: 233–252. DOI: [10.1016/0009-2541\(91\)90102-W](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90102-W)

Diatoms in a sediment core of Lake Raifskoye (Volzhsko-Kamsky Nature Reserve, Republic of Tatarstan): lake development over the past 1200 years

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYPalagushkina O.V.^{1*}, Li H.C.², Unkovskaya E.N.³, Frolova L.A.⁴¹ Kazan (Volga region) Federal University, Kremlevskaya street, 18, Kazan, 420008, Russia² Department of Geosciences, National Taiwan University Taipei, 106, Taiwan, POC³ Volzhsko-Kamsky State Natural Biosphere Reserve, Republic of Tatarstan, Zelenodolsk district, village Sadovy, st. Vekhova, 1, 422537, Russia⁴ Institute of archaeology and ethnography of the Russian Academy of Sciences, Acad. Lavrentiev Avenue 17, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. Studies of the diatom assembly in a 130-cm sediment core from Lake Raifskoye reveal 79 taxa of diatoms ranking below the genus of two classes (centric - 14, pennate - 65). ¹⁴C, ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating results show that the sediment core covers a continuous deposition since 1200 cal. yr BP. During the development of the lake, three periods were identified. In the range of 600-1200 years ago unfavourable conditions for the development of diatoms were noted, presumably due to low environmental temperatures. Period from 150-450 years ago reflects good conditions for the development of diatoms and, as a consequence, an increase in the productivity of algal communities in the lake against the backdrop of rising air temperatures. In the third, modern period, the processes of increasing the productivity of algal communities continue, which can also be associated with an increase in air temperature.

Keywords: bottom sediments, diatoms, Lake Raifskoye, climate change

For citation: Palagushkina O.V., Li H.C., Unkovskaya E.N., Frolova L.A. Diatoms in a sediment core of Lake Raifskoye (Volzhsko-Kamsky Nature Reserve, Republic of Tatarstan): Lake development over the past 1200 years // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 556-561. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-556

1. Introduction

Paleoecological and paleolimnological studies can contribute to the study of the manifestation of global processes at regional levels. The Middle Volga region is a large fragment of the Russian Plain with an area of 146,400 km², located in the central part of the Volga-Kama basin. The lack of data in the literature on paleoecological and paleolimnological studies in the Middle Volga region makes studies of this kind relevant.

Bottom sediments of karst lakes located in specially protected natural areas (SPNA) of federal significance can become valuable archives about the climate of the past. The location of these lakes in protected areas, where anthropogenic impacts are minimal, makes it possible to highlight the influence of climate on natural communities.

Bottom sediments of Lake Raifskoye, the largest karst lake in terms of area and volume in the Raifa section of the Volga-Kama Nature Reserve, were used as an archive of paleoecological information. According to the results of a hydrological survey of the reserve, the length of the lake is 1296 m with a maximum width of 320 m, a maximum depth of 20,3 m, the area of the lake is 31,99 hectares, and the volume of water is 2077,63 thousand m³ (Palagushkina et al., 2024). Throughout the history of its development, the lake has not experienced direct anthropogenic impact (Unkovskaya et al., 2020). This flowing karst reservoir, in its nutrition and regime, is connected with the Sumka River and its activities. Hydrochemical and hydrobiological studies of Lake Raifskoye have been carried out since 1996 using a unified methodology. In the species composition of phytoplankton, diatoms make up about 13% of the total composition (Palagushkina, 2004).

*Corresponding author.

E-mail address: opalagushkina@mail.ru (O.V. Palagushkina)

Received: June 14, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2. Materials and methods

In June 2023, using a UVITEC sampler, a 130 cm long column of bottom sediments was taken at the deepest point of the lake (23-RT-01A, Raifa Lake, 55°54.375' N, 048°43.680' E). The sediment of column was cut layer by layer with a high degree of resolution (1 cm) in the field. Radiocarbon dating of some samples (AMS 14C) was carried out at the NTUAMS Laboratory (National Taiwan University), the maximum age of the column was 1200 cal. yr BP.

Technical processing of 14 samples of bottom sediments for diatom analysis was carried out using the water bath method (Battarbee, 1986) at the Research Laboratory of Paleoclimatology, Paleoecology and Paleomagnetism of the Kazan (Volga Region) Federal University.

Highly refractive Naphrax resin was used to make permanent preparations. To determine the species composition, domestic and foreign key books were used. Valves were counted along parallel transects up to 300 per sample using an Axioplan Zeiss light microscope and immersion medium. The total number of valves was taken as 100%. Ecological and geographical characteristics of diatoms were given in relation to habitat, salinity, water pH, geographical distribution and temperature (Barinova et al., 2006). Column zoning was performed using cluster analysis in the PAST program (Hammer et al., 2001).

3. Results and discussion

In the species composition of the studied column, 79 taxa of diatoms were identified with a rank below the genus of two classes (centric - 14, pennate - 65). Clustering of the results divided the column into three zones: zone I - 40-130 cm or 600-1200 cal. yr BP, zone II - 10-31 cm or 150-450 cal. yr BP. and zone III - zone III - 0-1 cm (present time).

In ten samples of zone I (40-130 cm or 600-1200 cal. yr BP), 38 species were noted (5 of the centric class, 33 of the pennate class), but there was no reliable number of valves in the samples. The insufficient number of diatom valves may presumably be associated with unfavourable development conditions due to low environmental temperatures during this historical period.

The good development of diatoms and a reliable number of valves in the samples were confined to zone II (10-31 cm or 150-450 cal yr BP). In the species composition of the zone, 57 taxa of rank below genus were identified, which accounted for 72% of the total number of taxa in the column.

In terms of habitat within the zone, there is an increase in the proportion of planktonic species with dominant *Fragilaria crotonensis* Kitt. – from 11.7 to 35.2%, *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth from 17 to 28%, *Stephanodiscus hantzschii* Grun. in Cl. et Grun. From 0.5% to 19.1%, which indirectly reflects an increase in the water level in the lake. Among the subdominants, *Cyclotella bodanica* Eulenk. was noted. *Cyclotella iris* Brun et Hérib., but *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., *Stephanodiscus niagarae* Ehrb. dis-

appeared from the species composition of planktonic species, which may indirectly reflect processes of increasing air temperature. According to the salinity factor, the halophobic cold-loving *Eunotia praerupta* Ehrb., *Navicula placentula* (Ehrb.) Grun. and halophobic species - *Eunotia pectinalis* (Dillw.) Rabenh., *Fragilaria leptostauron* (Ehrb.) Hust. disappear from the species composition. In general, there is an increase in the proportion of halophilic valves with dominants *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Cyclotella meneghiniana* Kütz. (up to 14.5%).

In relation to the water pH factor, a decrease in the proportion of acidophilic species, such as *Eunotia pectinalis* (Dillw.) Rabenh., *Eunotia praerupta* Ehrb., *Navicula placentula* (Ehrb.) Grun. is noted and the growth of alkaliphilic and alkalibiotic species *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth and *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm. There is also a gradual decrease in the proportion of valves of cold-loving species. All of the above may indirectly reflect an increase in the productivity of algal communities in the lake against the background of rising air temperatures. With regard to the geographical location factor, a decrease in the proportion of valves of boreal species and an increase in the proportion of cosmopolitan species were noted.

In zone III, represented by one sample from a depth of 0-1 cm, 34 diatom taxa were noted (43% of the total number of species). Here, valves of planktonic alkalibiont species predominate with the dominants *Aulacoseira subarctica* and *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm., the *Fragilaria crotonensis* Kitt. disappeared from the dominants. *Stephanodiscus hantzschii* Grun., *Cyclotella bodanica* Eulenk. developed at the subdominant level.

In an increased proportion of valves of planktonic-benthic species, the halophilic *Cyclotella meneghiniana* Kütz. is monodominant. With regard to the water pH factor, there is an increase in the proportion of valves of species that prefer alkaline environmental conditions with the dominant the same *Cyclotella meneghiniana* Kütz. and the subdominant *Stephanodiscus hantzschii* Grun. in Cl. et Grun., with regard to the temperature factor, there is a complete absence of valves of cold-loving species. All of the above reflects an increase in the productivity of algae in the lake against the backdrop of rising air temperatures.

4. Conclusions

During the development of the lake, three periods were identified. In the range of 600-1200 years ago unfavourable conditions for the development of diatoms were noted, presumably due to low environmental temperatures. Period from 150-450 years ago reflects good conditions for the development of diatoms and, as a consequence, an increase in the productivity of algal communities in the lake against the backdrop of rising air temperatures. In the third, modern period, the processes of increasing the productivity of algal communities continue, which can also be associated with an increase in air temperature. The use of data obtained from other paleoindicators will make it possi-

ble to clarify the periods and features of changes in the environment.

5. Acknowledgments

Field and laboratory works founded by Kazan Federal University Strategic Academic Leadership Program (Priorities-2030).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Biodiversity of environmental indicator algae. Tel Aviv: Pilies Studio. 498 pp. (in Russian)

Battarbee R.W. Diatom analysis. 1986. In Berglund B.E. (ed) Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. J. Wiley & Sons. P.527-570.

Hammer Ø., Harper D.A.T., Raan P.D. 2001. PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica* 41: 9 p.

Palagushkina O.V. 2004. Ecology of phytoplankton in karst lakes of the Middle Volga region, Cand. Sci. (Biol.) Dissertation, Kazan, 197 p. (in Russian)

Palagushkina O.V., Unkovskaya E.N., Nazarova L.B. 2024. Influence of Climate Changes on the Structure of Summer Phytoplankton in a Forest Zone Lake (Raifskoe, Volga-Kama Nature Reserve). *Contemporary Problems of Ecology* 17 (2): 175–185. DOI: [10.15372/SEJ20240201](https://doi.org/10.15372/SEJ20240201)

Unkovskaya E.N., Galiakhmetova L.K., Shurmina N.V. et al. 2020. Hydrochemical indicators dynamics of the lakes of Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 607: 012025

Диатомовые водоросли донных осадков озера Раифское (Волжско-Камский заповедник, Республика Татарстан): развитие озера за последние 1200 лет

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПалагушкина О.В.¹, Ли Х.Ч.², Унковская Е.Н.³, Фролова Л.А.⁴¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008, Россия² Факультет геологических наук, Национальный тайваньский университет, Тайбэй, 106, Тайвань, Китайская республика³ Волжско-Камский государственный природный биосферный заповедник 422537, Республика Татарстан, Зеленодольский район, пос. Садовый, ул. Вехова, 1, Россия⁴ Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирская обл., Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 17

АННОТАЦИЯ. Исследования диатомовых колонки донных осадков озера Раифское выявило 79 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода двух классов (центрические – 14, пеннатные – 65). Результаты датирования ¹⁴C, ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs показывают, что керн демонстрирует непрерывное отложения, начиная с 1200 кал. лет назад. В процессе развития озера было выявлено три периода, в промежутке 600-1200 к.л.н. отмечены неблагоприятные условия для развития диатомовых, предположительно, из-за низких температур окружающей среды. Период с 150-450 к.л.н. отражает хорошие условия для развития диатомовых и, как следствие, повышение продуктивности водорослевых сообществ в озере на фоне повышения температуры воздуха. В третий, современный период, процессы повышения продуктивности водорослевых сообществ продолжаются, что также можно связывать с ростом температуры воздуха.

Ключевые слова: донные осадки, диатомовые, озеро Раифское, изменение климата

Для цитирования: Палагушкина О.В., Ли Х.Ч., Унковская Е.Н., Фролова Л.А. Диатомовые водоросли донных осадков озера Раифское (Волжско-Камский заповедник, Республика Татарстан): развитие озера за последние 1200 лет // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 556-561. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-556

1. Введение

Палеоэкологические и палеолимнологические исследования могут способствовать изучению проявления глобальных процессов на региональных уровнях. Регион Среднего Поволжья – это крупный фрагмент Русской равнины площадью 146,4 тыс. км², находящийся в центральной части Волжско-Камского бассейна. Отсутствие в литературе данных о палеоэкологических и палеолимнологических исследованиях в регионе Среднего Поволжья делает изучения подобного рода актуальными.

Ценными архивами о климате прошлого могут стать донные отложения карстовых озер, расположенных на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) федерального значения. Нахождение этих озер на ООПТ, где антропогенные воздействия минимальны, дает возможность выделить именно влияние климата на природные сообщества.

В качестве архива палеоэкологической

информации использовались донные отложения озера Раифского - самого большого по площади и объему карстового озера Раифского участка Волжско-Камского заповедника. По результатам гидрологической съемки заповедника длина озера составляет 1296 м при максимальной ширине 320 м, максимальная глубина равна 20,3 м, площадь озера составляет 31,99 га, объем воды равен 2077,63 тыс. м³ (Палагушкина и др., 2024). На протяжении всей истории своего развития озеро не испытывало прямого антропогенного воздействия (Unkovskaya et al., 2020). Этот проточный карстовый водоем, в своем питании и режиме связан с рекой Сумкой и ее деятельностью. Гидрохимические и гидробиологические исследования озера Раифское проводятся с 1996 года с использованием единой методики. В видовом составе фитопланктона диатомовые водоросли составляют около 13 % общего состава (Палагушкина, 2004).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: opalagushkina@mail.ru (О.В. Палагушкина)

Поступила: 14 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

В июне 2023 г. с помощью пробоотборника UVITEC в самой глубокой точке была взята колонка донных отложений длиной 130 см озера (23-RT-01A, Raifa Lake, 55°54.375' N, 048°43.680' E). Колонка донных отложений была нарезана послойно с высокой степенью разрешения (1 см) в полевых условиях. Датирование части образцов радиоуглеродным методом (AMS 14C) было выполнено в Лаборатории NTUAMS (Национальный Тайваньский университет), максимальный возраст колонки составил 1200 календарных лет назад (кал.л.н.). Техническая обработка 14 образцов донных отложений на диатомовый анализ проводилась с использованием метода водяной бани (Battarbee, 1986) в НИЛ «Палеоклиматологии, палеоэкологии и палеомагнетизма» Казанского (Приволжского) федерального университета. Для изготовления постоянных препаратов использовалась высокопреломляющая смола Naphrax. При определении видового состава использовались отечественные и зарубежные определители. Подсчет створок проводился по параллельным трансектам до 300 в образце с использованием светового микроскопа AxioPlan Zeiss и иммерсионной среды. Общее число створок бралось за 100%. Эколого-географическая характеристика диатомовых давалась по отношению к местообитанию, солености, pH воды, по географическому распространению и температурной приуроченности (Барина и др., 2006). Зонирование колонки выполнено при помощи кластерного анализа в программе PAST (Hammer et al., 2001).

3. Результаты и обсуждение

В видовом составе исследуемой колонки было определено 79 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода двух классов (центрические – 14, пеннатные – 65). Кластеризация результатов разделила колонку на три зоны: зона I - 40-130 см или 600-1200 к.л.н., зона II - 10-31 см или 150-450 к.л.н. и зона III – 0-1 см, поверхностные донные осадки. В десяти образцах зоны I (40-130 см или 600-1200 к.л.н.) было отмечено 38 видов (5 – класса центрические, 33 – пеннатные), но достоверного количества створок в образцах не было. Недостаточное количество створок диатомовых может быть предположительно связано с неблагоприятными условиями развития из-за низких температур окружающей среды в этот исторический промежуток.

Хорошее развитие диатомовых и достоверное количество створок в образцах было приурочено к зоне II (10-31 см или 150-450 к.л.н.). В видовом составе зоны было определено 57 таксонов рангом ниже рода, что составило 72% от общего числа таксонов в колонке. По местообитанию в пределах зоны отмечается увеличение доли створок планктонных видов с доминантами *Fragilaria crotonensis* Kitt. – от 11,7 до 35,2%, *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth от 17 до 28%, *Stephanodiscus hantzschii* Grun. in Cl. et Grun. От 0,5% до 19,1%, что косвенно отражает

повышение уровня воды в озере. Среди субдоминантов отмечены *Cyclotella bodanica* Eulenst. in Grun., *Cyclotella iris* Brun et Hérib., но из видового состава планктонных видов исчезли *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Simons., *Stephanodiscus niagarae* Ehrb., что может косвенно отражать и процессы повышение температуры воздуха. В отношении фактора солености из видового состава исчезают галофобные холодолюбивые *Eunotia praerupta* Ehrb. и *Navicula placentula* (Ehrb.) Grun., галофобные виды - *Eunotia pectinalis* (Dillw.) Rabenh., *Fragilaria leptostauron* (Ehrb.) Hust. В целом отмечается рост доли створок галофильных с доминантами *Fragilaria crotonensis* Kitt., *Cyclotella meneghiniana* Kütz. (до 14,5%). В отношении фактора pH среды отмечается уменьшение доли ацидофильных видов, таких как *Eunotia pectinalis* (Dillw.) Rabenh. *Eunotia praerupta* Ehrb., *Navicula placentula* (Ehrb.) Grun., рост алкалофильных и алкалобионтных видов *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth и *Cyclotella radiososa* (Grun.) Lemm. Также отмечается постепенное уменьшение доли створок холодолюбивых видов. Все перечисленное может косвенно отражать повышение продуктивности водорослевых сообществ в озере на фоне повышения температуры воздуха. В отношении фактора географической приуроченности отмечалось снижение доли створок бореальных видов и рост доли створок космополитных. В зоне III, представленной одним образцом с глубины 0-1 см, было отмечено 34 таксона диатомовых (43% от общего числа видов). Здесь преобладают створки планктонных алкалобионтных видов с доминантами *Aulacoseira subarctica* и *Cyclotella radiososa* (Grun.) Lemm., из числа доминантов исчез вид *Fragilaria crotonensis* Kitt., на уровне субдоминантов развивались *Stephanodiscus hantzschii* Grun., *Cyclotella bodanica* Eulenst. in Grun. В увеличенной доле створок планктонно-бентосных видов монодоминирует галофильный *Cyclotella meneghiniana* Kütz. В отношении фактора pH среды отмечается увеличение доли створок видов, предпочитающих щелочные условия среды с тем же доминантом *Cyclotella meneghiniana* Kütz. и субдоминантом *Stephanodiscus hantzschii* Grun. in Cl. et Grun., в отношении температурного фактора отмечается полное отсутствие створок холодолюбивых видов. Все перечисленное отражает рост продуктивности водорослей в озере на фоне повышения температуры воздуха.

4. Заключение

В процессе развития озера было выявлено три периода, в промежуток 600-1200 к.л.н. отмечены неблагоприятные условия для развития диатомовых, предположительно, из-за низких температур окружающей среды. Период с 150-450 к.л.н. отражает хорошие условия для развития диатомовых и, как следствие, повышение продуктивности водорослевых сообществ в озере на фоне повышения температуры воздуха. В третий, современный период, процессы повышения продуктивности водорослевых сообществ продолжают, что также можно связы-

вать с ростом температуры воздуха. Использование данных, полученных от других палеоиндикаторов, позволит уточнить периоды и особенности изменений в окружающей среде.

Благодарности

Полевые и лабораторные работы были выполнены в рамках Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета (Приоритет-2030).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Список литературы

Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio, 498 с.

Battarbee R.W. Diatom analysis. 1986. In Berglund B.E. (ed) Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. J. Wiley & Sons. P.527-570.

Hammer Ø., Harper D.A.T., Raan P.D. 2001. PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica* 41: 9 p.

Палагушкина О. В. 2004. Экология фитопланктона карстовых озер Среднего Поволжья: дис. канд. биол. наук. Казань, 197 с.

Палагушкина О.В., Унковская Е.Н., Назарова Л.Б. 2024. Влияние климатических изменений на структуру летнего фитопланктона озера лесной зоны (Раифское, Волжско-Камский заповедник). *Сибирский экологический журнал* 2: 187–199, DOI: [10.15372/SEJ20240201](https://doi.org/10.15372/SEJ20240201)

Unkovskaya E.N., Galiakhmetova L.K., Shurmina N.V. et al. 2020. Hydrochemical indicators dynamics of the lakes of Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 607: 012025

Indicators of paleocryogenic processes that disrupt the patterns of peatland autogenic development in the zone of seasonal freezing of rocks of Western Siberia

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Preis Yu.I.

Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Academicheskoy ave., 10/3, Tomsk, 634005, Russia

ABSTRACT. On the data of detailed studies in 2003-2019 and dating of ^{14}C , AMS, ^{210}Pb and ^{137}Cs peat sections of the zone of seasonal freezing of rocks of Western Siberia indicators of paleocryogenic processes were searched. The functional state of these peatlands was reconstructed as a response to continental climate changes. A system-evolutionary methodological approach to the search for disturbances of autogenic development of peatlands, dating of pairs of neighboring peat samples to identify the peat accumulation stopping, data on peat sections - analogues from the permafrost zone and data on paleoreconstructions of the Holocene climate of Western Siberia were used. This allowed indicators of paleocryogenic processes to be proposed. The use of these indicators will increase the objectivity of studying the climatic paleoreconstructions of the territory.

Keywords: Indicator, cryogenic process, peat deposit, Holocene, zone of seasonal freezing of rocks, Western Siberia

For citation: Preis Yu.I. Indicators of paleocryogenic processes that disrupt the patterns of peatland autogenic development in the zone of seasonal freezing of rocks of Western Siberia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 562-567. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-562

1. Introduction

Currently, there are several reconstructions of the Holocene climate for the forest zone of Western Siberia based on the spore-pollen spectra of peat deposits. However, they differ not only in detail, but also in age boundaries and extremes of periods of cooling and warming. In our opinion, this is largely due to the underestimation of the regional features of the genesis and dynamics of peatlands - the basic objects of paleoreconstructions, that were formed under continental climate conditions. Despite the repeated findings here of permafrost heaving peat mounds - relics of Holocene cooling events (review in Vasilchuk et al., 2008), climate paleoreconstructions do not take into account the influence of cryogenic processes that disrupt the autogenic course of peatland development and cause the loss of spore-pollen spectra during periods of peat accumulation stopping. This is due to the lack of methods for reconstructing these processes in peat deposits outside the permafrost zone.

The purpose of the study is to search for paleocryogenic processes indicators in peat deposits

in the zone of seasonal freezing of rocks in Western Siberia.

2. Materials and methods

The objects of the study are the peatlands of Western Siberia (from the middle taiga to the forest-steppe), where from 2003 to 2019 studies of peat deposits were carried out to their full depth with a peat sampling step of 2-5 cm. Peat samples were analyzed for botanical composition, degree of decomposition (*DD*, %), ash content (*A*, %, bulk density (*BD*, g dm³) and moisture content (*MC*, %). To determine the age of the peat samples, radiocarbon dating by ^{14}C , AMS, as well as by ^{137}Cs , ^{210}Pb was used. To identify peat accumulation stoppings, pairs of neighboring samples were dated.

Reconstruction of the paleohydrology of the peatlands was carried out by calculating the index of wet (*IW*, point) according to (Elina and Yurkovskaya, 1992) and taking into account the *DD* and *BD* indicators of peat.

*Corresponding author.

E-mail address: preisyui@rambler.ru (Yu.I. Preis)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



To search and determine the type of paleocryogenic processes in peat deposits and underlying soils, a system-evolutionary methodological approach to identify disturbances in the peatland autogenic development by external factors and indicators of the influence of cryogenic processes on the dynamics, stratigraphy of peatlands and properties of peats were used. For indicators identification analysis of the peatlands data of the modern permafrost zone of the Holarctic (Vasilchuk et al., 2008), relict palsas of the Western Siberia forest zone (review in Vasilchuk, 2013) and our studies of the Central Siberia northern taiga peatlands (Preis, 2002; 2004) were used. We accepted that during the Holocene cooling periods (Volkova et al., 2002), similar disturbances in the peatlands of Western Siberia outside the permafrost zone were caused by cryogenic processes too.

3. Results and discussion

The following disturbances in the peatlands autogenic have been identified: 1) the pulsating nature of paludification; 2) discrepancy between the paludification type and the richness of the underlying soils; 3) incomplete peatland development cycle - loss of eutrophic or mesotrophic stages; 4) return or pseudo-return to a lower stage of development; 5) sharp changes in the species composition and structure of paleophytocenoses, indicating a severance of successional connections by external factors; 6) the absence of a consistent change in the indicators *IW* and *DD*, *BD*, *MC* along the peat deposit depth, indicating a secondary change in the properties of peat; 7) unreasonably low peat accumulation rates, indicating the presence of stopping its accumulation.

The following indicators of paleocryogenic processes in peat deposits and underlying soils have been proposed.

1. Mesotrophic paludification of carbonate soils. The start cooling, the formation of permafrost or long-term thawing seasonally frozen water-proofs in soils, which favors the appearance of meso- and oligotrophic sphagnum mosses indicates.

2. The pulsating nature of mesotrophic paludification with peat accumulation stopping and a secondary change in the peat properties. A sharp change in the hydrothermal regimes of peatland ecotopes during the directed warming period after global cooling, which caused the formation of a layer of permafrost soil indicates. The influx of water from degrading permafrost promotes the peat accumulation, then a decrease in the groundwater level after complete permafrost degradation causes depaludification, an increase in *DD*, *A*, *BD* and a decrease in the *MC* of peats.

3. Oligotrophic paludification of carbonate soils. The start of warming after global cooling and the start of degradation of permafrost water-proof layer in soil, which had previously isolated rich groundwater indicates. Active transgression of oligotrophic sphagnum mosses is caused by the formation of weakly mineralized over-permafrost water layer from atmospheric precipitation.

Most likely, the paludification type depends on the thickness of the permafrost layer. The climatic conditionality of mesotrophic and oligotrophic types of the paludification and the influence of cryogenic processes is confirmed by inversions and pseudo-inversions in peat deposits, reflecting a return to the lithogen-determined eutrophic stage of development after the permafrost degradation and the death of oligotrophic sphagnum mosses, mainly due to their flooding.

4. The peat accumulation stopping with the formation of the paleostratigraphic boundary (PSB). A sharp change in the hydrothermal regimes of peatland ecotopes and climate it indicates. At the first stage – climate aridization, which causes drying of the peatland surface up to afforestation of even previously highly watered ecotopes and formation of well-decomposed peat - the lower layer of the PSB. At the second stage - cooling, which causes freezing peat deposit and palsa formation, accompanied by ice accumulation due to water migration to the freezing front, and peat accumulation stopping. On the third stage - climate warming, which causes gradual or sharp degradation of palsa. In the first case, the formation of over-permafrost water layer from atmospheric precipitation causes catastrophic oligotrophization of vegetation and formation of the poorly decomposed raised bog peat, fuscum or magellanic - the upper layer of the PSB. With sharp degradation of permafrost, a secondary pool is formed, by the high *MC* and low *BD* of the lower layer of the PSB as evidenced. When it is overgrown, a layer of the poorly decomposed raised bog swamp peat formation usually, but with additional intake of rich water, a layer of low-mire swamp peat formation. Such secondary pools can exist for a long time, up to the present, which excludes the presence of an upper layer PSB. Usually at the bottom of such pools there is a layer of liquefied destructured peat, re-deposited from its sides.

The cryogenic nature of the peat accumulation stopping by their confinement to a period of a certain global cooling, as well as the gradual oligotrophization of vegetation without the formation of PSB and the absence of peat accumulation stopping in peat deposit of other bogs of the region during this period is confirmed. This is also confirmed by the significantly smaller thickness of the lower layer of the PSB compared to the similar layer in the peat deposits of the peatlands of Western and Eastern Europe, as well as Urals, formed in a temperate continental climate, where paleocryogenic processes were absent or less pronounced, and the drying out of the peatlands continued in the subsequent years dry cooling period.

Figure shows a peat section № 1 in the ryam of Bakchar bog with indicators of the cryogenic processes influence during paludification and at later stages of its development.

4. Conclusions

Thus, indicators of paleocryogenic processes have been proposed for peatlands in the seasonal freezing zone of rocks of Western Siberia, the use of which will make it possible to obtain more objective data on paleoclimatic reconstructions.

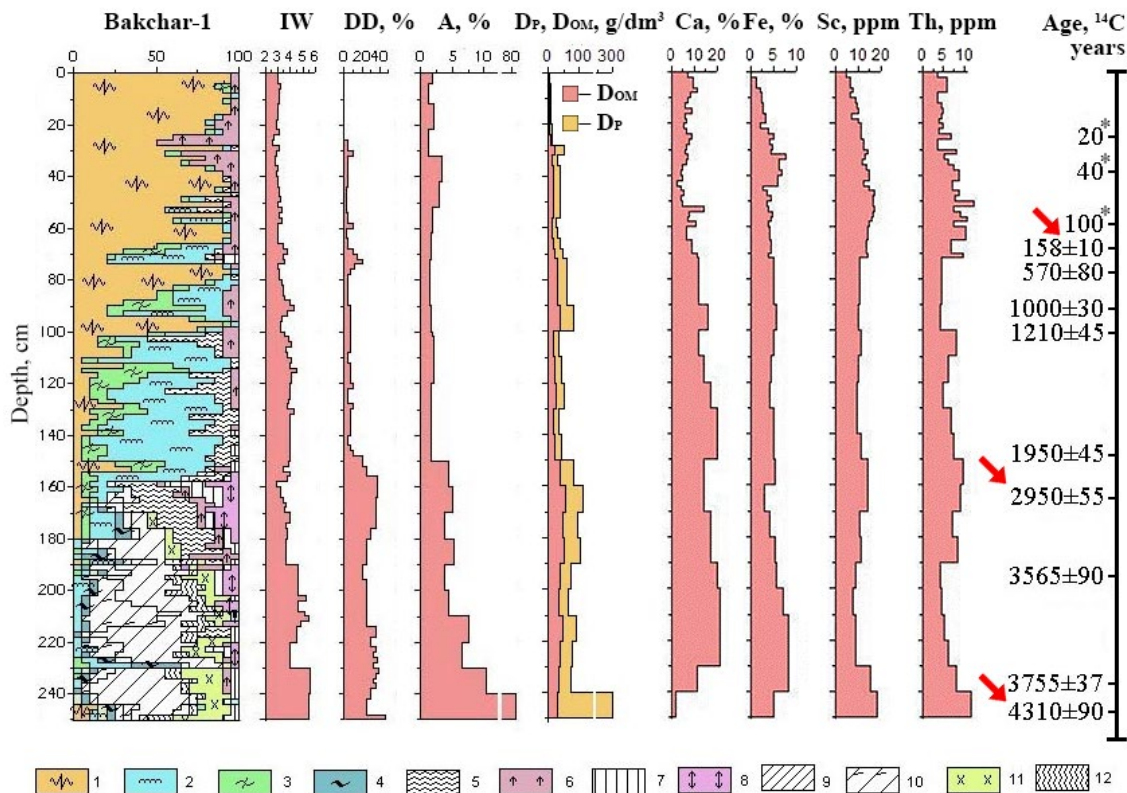


Fig. Botanical composition and peat properties of peat section № 1 in the ryam of Bakchar bog. Peat properties: IW – index of wet index of wet, point; DD – decomposition degy, %; A – ash content, %; *BD* – bulk density of dry peat and organic matter, g/dm³. Plant remains: 1) *Sphagnum fuscum*; 2) *S. magellanicum*; 3) *S. angustifolium*; 4) *S. jensenii*; 5) cotton grass; 6) Ericaceae; 7) wood remains; 8) *Betula nana*; 9) *C. lasiocarpa*; 10) *C. rostrata*; 11) *Equisetum*; 12) reed. * - Dating by ²¹⁰Pb. The red arrow shows the depth of peat accumulation stopping.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

References

Elina G.A., Yurkovskaya T.K. 1992. Methods for determining the paleohydrological regime as the basis for objectifying the causes of succession of swamp vegetation. *Botanical Journal*. 77 (7): 120–124. (in Russian)
 Preis Yu.I. 2002. Ridge-hollow complexes of lowland bogs of the permafrost zone of Central Siberia. *News of Tomsk Polytechnic University*. 305 (6): 89 – 101. (in Russian)
 Preis Yu.I. 2004. Inversion ridge-hollow complexes of lowland bogs of the permafrost zone of Central Siberia. *News of Tomsk Polytechnic University*. 307 (4): 89 – 101. (in Russian)

Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Yu.N. 2008. Convex heaving mounds of permafrost peat massifs. M., Publishing house Moskow University. 571. (in Russian)
 Vasilchuk Yu.K. 2013. Current position of the southern border of the permafrost zone of the West Siberian Lowland. *Earth’s Cryosphere XVII* (1): 17–27. (in Russian)
 Volkova V.S., Gnibidenko Z.N., Goryacheva A.A. 2002. Holocene climatic rhythms of the central part of the West Siberian Plain (palynology, magnetism), in: Basic patterns of global and regional changes in climate and natural environment in the Late Cenozoic of Siberia. Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Archeology and Ethnography SB RAS. 48–57. (in Russian)

Индикаторы палеокриогенных процессов, нарушающих закономерности аутогенного развития болот в зоне сезонного промерзания пород Западной Сибири

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Прейс Ю.И.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, просп. Академический, 10/3, Томск, 634005, Россия

АННОТАЦИЯ. По данным детальных исследований ботанического состава и общетехнических свойств торфяных разрезов и датирования по ^{14}C , AMS, ^{210}Pb и ^{137}Cs выполнена реконструкция функционального состояния болот зоны сезонного промерзания пород Западной Сибири в голоцене, как отклик на изменение континентального климата. Применение системно-эволюционного методического подхода поиска нарушений аутогенного развития болот, датирование пар соседних образцов торфа для выявления прекращений его аккумуляции, использование данных по торфяным разрезам - аналогом из криолитозоны и имеющиеся палеореконструкции климата Западной Сибири позволили предложить индикаторы палеокриогенных процессов, использование которых повысит объективность палеореконструкций климата района исследования.

Ключевые слова: индикаторы, криогенные процессы, торфяные отложения, голоцен, зона сезонного промерзания пород, Западная Сибирь

Для цитирования: Прейс Ю.И. Индикаторы палеокриогенных процессов, нарушающих закономерности аутогенного развития болот в зоне сезонного промерзания пород Западной Сибири // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 562-567. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-562)

1. Введение

В настоящее время имеются несколько реконструкций климата голоцена для лесной зоны Западной Сибири по спорово-пыльцевым спектрам болотных и озерно-болотных отложений. Однако они различаются не только детальностью, но и возрастными границами и экстремумами периодов похолоданий и потеплений. По нашему мнению, это в значительной степени обусловлено недоучетом региональных особенностей генезиса и динамики болот - базовых объектов палеореконструкций, формировавшихся в условиях континентального климата. Несмотря на неоднократные находки здесь многолетнемерзлых торфяных бугров пучения - реликтов похолоданий голоцена (обзор в Васильчук и др., 2008) при палеореконструкциях климата не учитывается влияние криогенных процессов, нарушающих аутогенный ход развития болот и вызывающих потерю спорово-пыльцевых спектров в периоды прекращений аккумуляции торфа. Это связано с отсутствием методики реконструкции этих про-

цессов в торфяных отложениях вне криолитозоны.

Цель исследования - поиск индикаторов палеокриогенных процессов в торфяных отложениях болот зоны сезонного промерзания пород Западной Сибири для повышения объективности реконструкций климата голоцена.

2. Материалы и методы

Объектами исследования являются болота Западной Сибири (от средней тайги до лесостепи), на которых с 2003 по 2019 гг. проводились комплексные исследования торфяных залежей на полную их глубину с шагом отбора проб торфа 2-5 см. Пробы торфа проанализированы на ботанический состав, степень разложения (R , %), зольность (A , %, плотность (P , %) и естественную влажность ($W_{\text{ест}}$, %). Для определения возраста образцов применялось радиоуглеродное датирование по ^{14}C и AMS, а также по ^{137}Cs , ^{210}Pb . Для выявления перерывов торфонакопления датировались пары соседних образцов.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: preisyui@rambler.ru (Ю.И. Прейс)

Поступила: 11 июня 2024; **Принята:** 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Реконструкция палеогидрологии болот выполнена методом расчета индекса влажности (IW) по (Елина и Юрковская, 1992) и с учетом показателей R и P торфа.

Для поиска и определения вида палеокриогенных процессов в торфяных разрезах и подстилающих их грунтах использован системно-эволюционный методический подход выявления нарушений аутогенного развития болот внешними факторами и комплекс индикаторов влияния криогенных процессов на динамику, стратиграфию болот и свойства торфов. Комплекс индикаторов выявлен на основе анализа данных по болотам современной криолитозоны голарктики (Васильчук и др., 2008), реликтовым многолетнемерзлым (ММ) буграм пучения (БП) лесной зоны Западной Сибири (обзор в Васильчук, 2013) и наших исследований болот северной тайги Средней Сибири (Прейс, 2002; 2004). Принято допущение, что в периоды похолоданий голоцена (Волкова и др., 2002) подобные нарушения на болотах Западной Сибири и за пределами криолитозоны были вызваны криогенными процессами.

3. Результаты и обсуждение

Выявлены следующие нарушения аутогенного развития болот: 1) пульсирующий характер заболачивания; 2) несоответствие типа заболачивания богатству подстилающих грунтов; 3) неполный цикл развития болот – выпадение евтрофной или мезотрофной стадий; 4) возврат или псевдовозврат на более низкую стадию развития; 5) резкие изменения видового состава и структуры палеофитоценозов, свидетельствующие о разрыве сукцессионных связей внешними факторами; 6) отсутствие согласованного изменения показателей IW и R , P , $W_{\text{ест}}$ по глубине залежи, свидетельствующие о вторичном изменении свойств торфа; 7) неправомерно низкие показатели скорости аккумуляции торфа, свидетельствующие о наличии перерывов его накопления.

Предложены следующие индикаторы палеокриогенных процессов в торфяных отложениях и подстилающих их грунтах.

1. Мезотрофное заболачивание карбонатных грунтов. Индицирует начало влажного похолодания, формирование перелетков или длительно оттаивающих сезонномерзлых водоупоров в грунтах, что благоприятствует появлению мезо- и олиготрофных сфагновых мхов.

2. Пульсирующий характер мезотрофного заболачивания с перерывом торфонакопления и вторичным изменением свойств отложенного торфа. Индицирует резкое изменение гидротермических режимов болотных экотопов в период направленного потепления после глобального похолодания, вызывавшего формирование слоя ММ грунта. Поступление вод из деградирующей ММ сначала способствует отложению торфов, а понижение уровня грунтовых вод после полной ее деградации обуславливает разболачивание, повышение R , A , P и понижение $W_{\text{ест}}$ торфов.

3. Олиготрофное заболачивание карбонатных грунтов. Индицирует начало потепления после глобального похолодания и начало деградации слоя ММ грунта, являющегося водоупором, изолирующим богатые грунтовые воды. Активная трансгрессия олиготрофных сфагновых мхов обусловлена формированием слабоминерализованной надмерзлотной верховодки из атмосферных осадков.

Вероятнее всего тип заболачивания зависит от толщины ММ слоя. Климатическая обусловленность мезо- и олиготрофного типов заболачивания и влияние криогенных процессов подтверждается инверсиями и псевдоинверсиями в торфяных отложениях, отражающих возврат на литогеннообусловленный эвтрофный путь развития после деградации ММ и гибели олиготрофных сфагновых мхов, преимущественно в связи с их затоплением.

4. Прекращение торфонакопления с формированием палеостратиграфического рубежа (ПСР). Индицирует резкое изменение гидротермических режимов болотных экотопов и климата. На первой стадии аридизация климата, вызывающая обсыхание поверхности болота вплоть до облесения даже ранее высокообводненных экотопов и отложение хорошо разложившегося торфа – нижнего слоя ПСР. На второй стадии - похолодание, вызывающее промерзание и пучение торфяной залежи, сопровождающееся накоплением льда за счет миграции воды к фронту промерзания, и прекращение торфонакопления. На третьей стадии - потепление климата, вызывающее постепенную или резкую деградацию ММ. В первом случае, формирование надмерзлотной верховодки вызывает катастрофическую олиготрофизацию растительности и отложение верхового, слабо разложившегося фускум- или магелланикум-торфа - верхнего слоя ПСР. При резкой деградации ММ формируется вторичное озерко, о чем свидетельствует высокая $W_{\text{ест}}$ и низкая P нижнего слоя ПСР. При его зарастании обычно отлагается слой из верховых топяных видов торфа, а при дополнительном поступлении богатых вод – из низинных топяных видов торфа. Такие вторичные озерки могут существовать долго, вплоть до настоящего времени, что исключает наличие верхнего слоя ПСР. Обычно на дне таких озерков имеется слой разжиженного деградированного торфа, переотложенного с его бортов.

Криогенный характер прекращений торфонакопления подтверждается приуроченностью их к периоду определенного глобального похолодания, а также постепенной олиготрофизацией растительности без формирования ПСР и отсутствием прекращения торфонакопления на других болотах региона в данный период. Это подтверждает и значительно меньшая толщина нижнего слоя ПСР по сравнению с аналогичным слоем в торфяных отложениях болот Западной и Восточной Европы, а также Урала, формирующихся в условиях умеренно континентального климата, где палеокриогенные процессы отсутствовали или были менее выражены, а обсыхание болот продолжалось и в последующий период сухого похолодания.

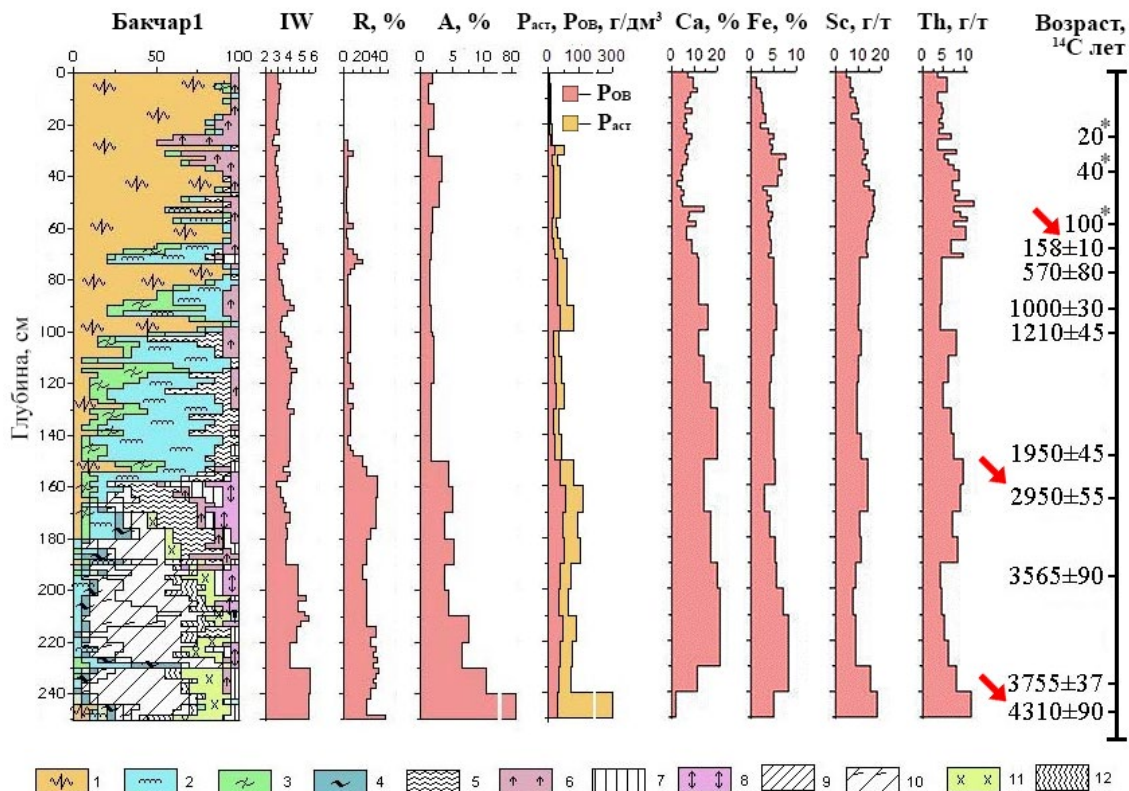


Рис. Ботанический состав и свойства торфа торфяного разреза № 1 в ряме верхового болота Бакчарское. Свойства торфа: IW – индекс влажности, ступень; R – степень разложения, %; A – зольность, %; P – объемная плотность а.с.т и ОВ, г/дм³. Растительные остатки: 1) *Sphagnum fuscum*; 2) *S. magellanicum*; 3) *S. angustifolium*; 4) *S. jensenii*; 5) пушица; 6) вересковые кустарнички; 7) древесные остатки; 8) ерник; 9) *C. lasiocarpa*; 10) *C. rostrata*; 11) хвощ; 12) тростник. * - датирование по ²¹⁰Pb. Красной стрелкой показана глубина прекращения аккумуляции торфа.

На рисунке представлен торфяной разрез № 1 в ряме верхового болота Бакчарское с признаками влияния криогенных процессов при заболачивании и на более поздних стадиях развития.

4. Выводы

Таким образом, предложены индикаторы палеокриогенных процессов для болот зоны сезонного промерзания пород Западной Сибири, использование которых позволит получать более объективные данные палеоклиматических реконструкций.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н. 2008. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых торфяных массивов. М., Изд-во Моск. ун-та. 571.

Васильчук Ю.К. 2013. Современное положение южной границы зоны многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской низменности. Криосфера Земли XVII (1): 17–27.

Волкова В.С., Гнибиденко З.Н., Горячева А.А. 2002. Климатическая ритмика голоцена центральной части Западно-Сибирской равнины (палинология, магнетизм), в: Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. Новосибирск: Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН. 48–57.

Елина Г.А., Юрковская Т.К. 1992. Методы определения палеогидрологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот. Ботанический журнал. 77 (7): 120–124.

Прейс Ю.И. 2002. Грядово-мочажинные комплексы низинных болот криолитозоны Средней Сибири. Известия Томского политехнического университета. 305 (6): 89 – 101.

Прейс Ю.И. 2004. Инверсионные грядово-мочажинные комплексы низинных болот криолитозоны Средней Сибири. Известия Томского политехнического ун-та. 307 (4): 89 – 101.

New data on the Pleistocene history of the Aral Sea-Lake

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYPanin A.V.^{1*}, Ludikova A.V.², Sapelko T.V.², Uspenskaya O.N.³,
Borisova O.K.¹, Zagorulko V.A.¹, Utkina A.O.¹¹Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Lane 29, 119017 Moscow, Russia²Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, SPC RAS, Sevastyanova str. 9, St. Petersburg, 196105, Russia³All-Russian Research Institute of Vegetable Growing, Vereya vill., str. 500, Ramensky district, Moscow Oblast, 140153, Russia

ABSTRACT. A 23.5 m deep borehole was drilled on the dried bed of the Aral Sea 9 km south of the former Barsakelmes Island. At a depth of 21.3 m, the borehole penetrated Paleogene bedrock. In the interval 21.3 - 15.2 m the conditions of a shallow freshwater reservoir at a considerable distance from the flowing rivers (deltaic channels of the Syr Darya River) - the first phase of filling of the Aral Basin with river water - were reconstructed. It has been preliminary attributed by three 14C AMS dates to the time about 23-25 thousand years BP. Above 15.2 m of the section the conditions become even more shallow, starting from 12.0 m of the section - brackish-water. The upper 10.5 m of the section correlates with the sediments of the modern geological phase of the Aral Sea development studied in detail in the same area by Burr et al. (2019), the beginning of which was estimated at 17.6 thousand BP. The new data obtained indicate an earlier appearance of the modern Aral Sea, which originated as a shallow freshwater body.

Keywords: bioanalysis, diatoms, spore-pollen analysis, non-pollen palynomorphs, radiocarbon dating

For citation: Panin A.V., Ludikova A.V., Sapelko T.V., Uspenskaya O.N., Borisova O.K., Zagorulko V.A., Utkina A.O. New data on the Pleistocene history of the Aral Sea-Lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 568-573. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-568

1. Introduction

The history of the Aral Sea at the end of the Quaternary period is recorded in marine (lacustrine) terraces, the heights and ages of which are still debated (Kes, 1991; Cretaux et al., 2013), and in bottom deposits, which as late as the last quarter of the 20th century could be studied only to a shallow depth using soil tubes (Maev et al., 1983). The drying up of the central part of the Aral Sea, which was completed by the end of the 2000s, opened up the possibility of drilling on the drained bottom, which allowed researchers to reconstruct the history of the sea for most of the Holocene (Krivonogov et al., 2010; Gus'kov et al., 2011; Boomer, 2012). The most complete section of lacustrine deposits was penetrated by borehole B-05-2009 at 29 m asl, 7 km south of the former island of Barsakelmes (Burr et al., 2019). The total thickness of the lacustrine deposits was 10.7 m, with the beginning of their accumulation estimated at 17.6 kcal BP. Below this were deposits called brown clays and diagnosed as non-lacustrine ('brown

non-lacustrine clays, a substratum'). The interval 10.7 - 14.9 m (borehole bottom) was not analysed or dated. This work answered the question of the age of the modern phase of the Aral Sea, but since the borehole did not reach bedrock, it remains unknown whether lacustrine deposits are present below the section.

2. Methods and Results

We attempted to determine whether there is evidence in the bottom deposits of earlier phases of the Aral Sea's development in the Late Pleistocene. For this purpose, in September 2023, borehole 23902 with a depth of 23.5 m was drilled 9 km south of the central part of Barsakelmes Island at the coordinates 45.52941°N, 59.90009°E. Drilling was carried out by Pride Mount 80 machine on the base of UAZ 3310 flatbed truck with 80 mm augers with continuous and complete core recovery. There were four main units in the section obtained.

Unit 1, 0 - 10.5 m: greenish-grey loam, carbonate, in some places with single layers of fine sand from

*Corresponding author.

E-mail address: a.v.panin@igras.ru (A.V. Panin)

Received: June 15, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the first millimetres to 3 cm thick. In the upper metre and below 6.5 m there were brownish tinged areas. Below 7.7 m, powdery and crystalline gypsum efflorescence was present.

Unit 2, 10.5 - 15.2 m: thin interlacing of loams and siltstones with fine sands, with layers of sandy loam and fine sands 20 to 70 cm thick. Colour brownish grey, light brown between 11.4 and 14 m.

Unit 3, 15.2 - 21.3 m clay loam, massive, compact, non-carbonate, grey, blackish in parts due to manganese, in the interval 16.2 - 18.3 m with reddish tint. In the interval 16.5 - 18.5 m there were abundant gypsum crystals in some places, in the interval 20.0 - 20.5 there were clay-carbonate concretions.

Unit 4, 21.3 - 23.5 m (bottom): greenish-bluish loam (aquamarine), with clay-carbonate concretions at 22.0-22.5 m, below 22.5 m - bluish grey, rich in angular concretions of pyrite (FeS) and marcasite (FeS₂).

Unit 4 contained highly mineralised pollen grains of ancient gymnosperms (Pinaceae/Podocarpaceae) and abundant remains of dinoflagellates, which, in combination with other features, allows us to attribute it to bedrock (marine Paleogene). In the upper 5-6 m, the section closely mirrored that of borehole B-05-2009 (Burr et al., 2019), but deeper our section was less sandy. In contrast, no brown clays were encountered at 10.7 m depth (as elsewhere below); below 10.5 m the section acquired brown tones indicative of well-aerated conditions, but became more sandy. Assuming that our layer 1 corresponds to the well-studied lacustrine deposits of well B-05-2009 (upper 10.7 m), we focused our efforts on studying layers 2 and 3. A number of analyses were performed on samples from these layers: granulometry, loss-on-ignition, biological remains, diatom, spore-pollen and non-pollen palynomorphs (NPPs).

In Unit 3 the composition of biological remains >0.25 mm was poor - single fragments of vegetative parts of higher plants. At depth 21.0 m (base of the Unit), parts of mouth apparatus of midge flies' larvae (Chironomidae) were found. Dinoflagellate cysts (especially abundant at the bottom of the layer; obviously a product of erosion of underlying bedrock), spicules of sponges, fungal spores, cocoons of turbellaria (ciliated worms, predominantly freshwater), eggs of rotifers (representatives of freshwater zooplankton), small fragments of arthropods, green algae *Botryococcus braunii* were found within the NPP. The abundance of pollen grains was highly variable. Pollen of herbaceous species prevailed, dominated in some places by Cyperaceae and Polygonaceae, in some places by Poaceae, Chenopodiaceae and Caryophyllaceae. Pollen of *Artemisia*, *Ephedra*, Fabaceae, Brassicaceae, Rosaceae, etc. was also recorded. At the top of the layer pollen of aquatic plants Nymphaeaceae appeared. Among trees pollen of Pinaceae prevailed. Pollen of *Betula*, *Salix* was also recorded. Among spore plants *Sphagnum* and Lycopodiaceae were found. Pollen of Poaceae and Chenopodiaceae prevailed among grass pollen. Pollen of Apiaceae, Polygonaceae, Cyperaceae, etc. was present in small quantities.

Throughout Unit 2, parts of vegetative organs of higher plants, especially *Typha*, freshwater Chara algae (singularly in the upper part of the layer, abundantly in the lower part), as well as ostracods and cladocera, were found in the composition of bioresidues >0.25 mm. The upper part of the unit contains rare valves of marine, brackish-marine and brackish-water littoral diatoms (*Diploneis bombus*, *D. didyma*, *Tryblionella compressa*, etc.). The diatom concentration is very low. At a depth of 12.0 m, diatom abundance notably increases. Brackish *T. compressa* and brackish-marine *D. didyma* typical of the Late Holocene and recent sediments of the Aral Sea, predominate in the diatom assemblage. The proportion of planktonic diatoms did not exceed 6%. They include brackish-marine and brackish *Chaetoceros* spp. and *Cyclotella choctawhatcheeana*, characteristic planktonic diatoms of the Aral Sea. No diatoms were found in samples below 12 m, including layer 3. Pollen composition was absolutely dominated by pollen of Chenopodiaceae and *Artemisia*. Pollen of Caryophyllaceae, Poaceae, Cyperaceae, Brassicaceae, Rubiaceae, etc. was also present. Pollen of aquatic plants was also represented by Nymphaeaceae. Among tree pollens, only Pinaceae pollen is recorded. Among non-pollen palynomorphs the content of microfungal remains slightly decreased. The number of fungal spores remained low. Green algae *Botryococcus braunii* and phytoliths were recorded sporadically.

3. Discussion and conclusions

It can be concluded that Units 2 and 3 were formed in conditions of a shallow water body, first freshwater, and in the upper half of layer 2 (starting from a depth of 12.0 m) - brackish-water. During the formation of Unit 3, the water body was somewhat deeper and the deltaic channels of River Syr-Darya were at a considerable distance. During the formation of Unit 2, shallow-marshy conditions periodically appeared, including in the upper half of the layer - shallow brackish-water environment. Unit 3 reflects the initial stage of filling of the Aral Basin with river water. The timing of this event can be judged from three 14C (AMS) total organic carbon (TOC) dates, cal BP: 22870 ± 140 (15.3 m depth), 24870 ± 130 (16.15 m) and 23580 ± 150 (21.0 m). Thus, the beginning of fresh water inflow into the Aral Basin and the first freshwater phase of the modern Aral Sea development in relation to it can be attributed to the time of 23-25 thousand years BP. However, taking into account that the dates were obtained using insufficiently reliable material (TOC, Corg content in sediment 0.4-0.5%), this age estimate should be considered preliminary. A more reliable estimate will be made later, taking into account the forthcoming results of OSL dating.

Acknowledgements

Field work, lithological analyses, and dating were carried out at the expense of the Russian Science Foundation (RSF) project 22-17-00259. Palynological

and diatom analyses were carried out within the framework of the state task of the Institute of Limnology RAS № FFZF-2024-0002 (A.V.Ludikova, T.V.Sapelko).

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest.

References

Boomer I. 2012. Ostracoda as indicators of climatic and human-influenced changes in the late quaternary of the ponto-caspian region (aral, caspian and black seas). In: Horne, D.J., Holmes, J., Rodriguez-Lazaro, J., Viehberg, F.A. (Eds.), *Ostracoda as Proxies for Quaternary Climate Change*. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 205-215.

Burr G.S., Krivonogov S.K., Gusskov S.A. et al. 2019. A history of the modern Aral Sea (Central Asia) since the Late Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*. 206: 141–149.

Cretaux J.-F., Letolle R., Berge-Nguyen M. 2013. History of Aral Sea level variability and current scientific debates. *Glob. Planet. Change* 110: 99-113.

Gus'kov S.A., Zhakov E.Y., Kuzmin Y.V. et al. 2011. New data on evolution of the Aral Sea and its relations with the West Siberian Plain through the Holocene. *Dokl. Earth Sci.* 437: 460-463.

Kes' A.S. 1991. Natural history of the Aral Sea and its surroundings. *Izvestiya Russ. Acad. Sci. Seria Geogr.* 4: 36-46. (in Russian)

Krivonogov S.K., Kuzmin Y.V., Burr G.S. et al. 2010. Environmental changes of the Aral Sea (central Asia) in the Holocene: major trends. *Radiocarbon* 52: 555-568.

Maev E.G., Maeva S.A., Nikolaev S.D. et al. 1983. Section of bottom sediments of the central part of the Aral Sea. *Paleogeografia Kaspiiskogo i Aralskogo Morei v Kainozoe*. Part 2. MSU, Moscow. pp. 119-133. (in Russian)

Новые данные о плейстоценовой истории Аральского моря-озера

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПанин А.В.^{1*}, Лудикова А.В.², Сапелко Т.В.², Успенская О.Н.³,
Борисова О.К.¹, Загорюлько В.А.¹, Уткина А.О.¹¹ Институт географии Российской академии наук. Россия, 119017, Москва, Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.² Институт озероведения Российской академии наук – СПб ФИЦ РАН. Россия, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, дом 9³ Всероссийский научно-исследовательский институт овощеводства — филиал ФГБНУ ФНЦО. Россия, 140153, Московская обл., Раменский район, д. Верея, стр. 500

АННОТАЦИЯ. Пробурена скважина глубиной 23.5 м на осушенном дне Аральского моря в 9 км к югу от бывшего острова Барсакельмес. На глубине 21.3 м скважина вскрыла коренные породы палеогена. В интервале 21.3 – 15.2 м реконструированы обстановки мелководного пресного водоема на значительном удалении от впадающих рек (дельтовые протоки р. Сырдарьи) – первая фаза заполнения Аральской котловины речными водами. Она предварительно отнесена по трем 14С AMS датам ко времени около 23-25 тыс.л.н. Выше 15.2 м разреза обстановки становятся еще более мелководными, начиная с 12.0 м разреза – солоноватоводными. Верхние 10.5 м разреза коррелируются с детально изученными в том же районе Burr et al. (2019) отложениями современной геологической фазы развития Арала, начало которой оценено в 17.6 тыс.л.н. Полученные данные указывают на более раннее появление современного Арала, зародившегося как мелководный пресный водоем.

Ключевые слова: биоанализ, диатомовые, спорово-пыльцевой анализ, непыльцевые палиноморфы, радиоуглеродное датирование

Для цитирования: Панин А.В., Лудикова А.В., Сапелко Т.В., Успенская О.Н., Борисова О.К., Загорюлько В.А., Уткина А.О. Новые данные о плейстоценовой истории Аральского моря-озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 568-573. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-568](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-568)

1. Введение

История Аральского моря в конце четвертичного периода «записана» в морских (озерных) террасах, уровни и возраст которых до сих пор дискутируются (Кесь, 1991; Cretaux et al., 2013), и в донных отложениях, которые еще в последней четверти XX в. было возможно изучать лишь на небольшую глубину с помощью грунтовых трубок (Маев и др., 1983). Пересыхание центральной части Арала, завершившееся к концу 2000-х гг, открыло перед исследователями возможность бурения на осушенном дне, что позволило реконструировать историю моря в объеме большей части голоцена (Krivonogov et al., 2010; Гуськов и др., 2011; Boomer, 2012). Наиболее полный разрез озерных отложений был вскрыт скважиной В-05-2009 на уровне 29 м БС в 7 км к югу от бывшего о. Барсакельмес (Burr et al., 2019). Общая мощность озерных отло-

жений составила 10.7 м, начало их накопления оценено в 17.6 тыс. кал.л.н. Ниже залежали отложения, названные коричневыми глинами и диагностированные как неозерные («brown non-lacustrine clays, a substratum»). Интервал 10.7 - 14.9 м (забой скважины) не анализировался и не датировался. Данная работа ответила на вопрос о возрасте современной фазы развития Арала, но поскольку скважина не дошла до коренных пород, осталось неизвестным, присутствуют озерные/морские отложения ли ниже по разрезу.

2. Методы и результаты

Мы попытались установить, имеются ли в разрезе донных отложений Арала свидетельства более ранних фаз его развития Арала в позднем плейстоцене. С этой целью в сентябре 2023 г в 9 км к югу от центральной части о. Барсакельмес в точке с коор-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: a.v.panin@igras.ru (А.В. Панин)

Поступила: 15 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



динатами 45.52941°с.ш., 59.90009°в.д. была пробурена скважина 23902 глубиной 23.5 м. Бурение производилось станком Pride Mount 80 на базе бортового автомобиля УАЗ 3310 шнеками диаметром 80 мм с непрерывным и полным извлечением керна. В полученном разрезе выделено 4 основных слоя.

Слой 1, 0 – 10.5 м: суглинок зеленовато-серый, карбонатный, местами с единичными слоями тонкого песка толщиной от первых миллиметров до 3 см. В верхнем метре и ниже 6.5 м – участки с коричневатым оттенком. Ниже 7.7 м присутствуют порошкообразные и кристаллические выделения гипса.

Слой 2, 10.5 – 15.2 м: тонкое переслаивание суглинков и алевролитов с тонкими песками, присутствуют слои супесей и тонких песков толщиной от 20 до 70 см. Цвет коричневатый-серый, в интервале 11.4 – 14 м – светло-коричневый.

Слой 3, 15.2 – 21.3 м суглинок тяжелый, некарбонатный, плотный, серый, участками черноватый за счет омарганцевания, в интервале 16.2 – 18.3 м с рыжеватым оттенком. В интервале 16.5 – 18.5 м местами обильные кристаллы гипса, в интервале 20.0 – 20.5 присутствуют глинисто-карбонатные конкреции.

Слой 4, 21.3 – 23.5 м (забой): суглинок зеленовато-голубоватый (аквамарин), с глинисто-карбонатными конкрециями на 22.0-22.5 м, ниже 22.5 м – голубовато-серый, насыщенный угловатыми конкрециями пирита (FeS) и марказита (FeS₂).

Слой 4 содержал сильно минерализованные пыльцевые зерна древних голосеменных (Pinaceae/Rodocarpaceae), а также обильные остатки динофлагеллят, что в совокупности с другими признаками позволяет отнести его к коренным породам (морской палеоген). В верхних 5-6 м разрез близко повторял разрез скважины В-05-2009 (Burr et al., 2019), однако глубже наш разрез был менее песчаным. Напротив, на глубине 10.7 м (как и где-либо ниже) не было встречено коричневых глин, ниже 10.5 м разрез приобрел коричневые тона, свидетельствующие об условиях хорошей аэрации, но стал более песчаным. Предполагая, что наш слой 1 соответствует хорошо изученным озерно-морским отложениям скважины В-05-2009 (верхние 10.7 м), мы сосредоточили усилия на изучении слоев 2 и 3. По образцам из этих слоев был выполнен ряд анализов: литологический (гранулометрия, потери при прокаливании), биоостатков, диатомовый, спорово-пыльцевой и непыльцевых палиноморф (НПП).

В слое 3 состав биоостатков >0.25 мм очень беден – единичные фрагменты вегетативных частей высших растений. В основании слоя на глубине 21.0 м встречены части ротового аппарата комаров (Chironomidae). В составе НПП встречены цисты динофлагеллят (особенно обильные в низах слоя; очевидно, продукт размыва нижележащих коренных пород), спиккулы губок, споры грибов, коконы турбеллярии (ресничные черви, преимущественно пресноводные), яйца коловраток (представители пресноводного зоопланктона), мелкие фрагменты членистоногих, зеленые водоросли *Botryococcus*

braunii. Концентрация пыльцевых зерен крайне изменчивая. Преобладает пыльца травянистых растений, среди которой доминируют местами Cyperaceae и Polygonaceae, местами Poaceae, Chenopodiaceae и Caryophyllaceae. Также отмечена пыльца *Artemisia*, *Ephedra*, Fabaceae, Brassicaceae, Rosaceae и др. В верхах слоя появляется пыльца водных растений Nymphaeaceae. Среди пыльцы древесных преобладает пыльца Pinaceae. Отмечена также пыльца *Betula*, *Salix*. Среди споровых растений отмечены *Sphagnum* и Lycoperidaceae. Среди пыльцы трав преобладает пыльца Poaceae и Chenopodiaceae. В небольших количествах присутствует пыльца Apiaceae, Polygonaceae, Cyperaceae и др.

По всему слою 2 в составе биоостатков >0.25 мм встречены части вегетативных органов высших растений, особенно рогоза (*Typha*), пресноводных харовых водорослей (в верхней части слоя единично, в нижней – обильно), а также остракоды, кладоцеры. В верхней части слоя отмечены редкие створки морских, солоноватоводно-морских и солоноватоводных литоральных диатомей (*Diploneis bombus*, *D. didyma*, *Tryblionella compressa* и др.). Концентрация створок крайне низкая. На глубине 12.0 м содержание диатомей заметно возрастает. Доминируют солоноватоводная *T. compressa* и солоноватоводно-морской *D. didyma*, характерные для позднего-лоценовых и современных отложений Аральского моря. Доля планктонных диатомей не превышает 6%. Они представлены солоноватоводно-морскими и солоноватоводными *Chaetoceros* spp. и *Cyclotella choctawhatcheeana*, характерными для диатомового планктона Аральского моря. В образцах ниже 12 м, в том числе в слое 3, диатомеи обнаружены не были. В составе пыльцы абсолютно доминирует пыльца маревых и полыней. Встречается пыльца Caryophyllaceae, Poaceae, Cyperaceae, Brassicaceae, Rubiaceae и др. Пыльца водных растений все так же представлена Nymphaeaceae. Среди пыльцы древесных отмечается только пыльца Pinaceae. Среди непыльцевых палиноморф немного снижается содержание остатков микрофауны. Количество спор грибов остается невысоким. Единично отмечены зеленые водоросли *Botryococcus braunii* и фитолиты.

3. Обсуждение и выводы

Можно заключить, что слои 2 и 3 формировались в условиях мелководного водоема, сначала пресноводного, а в верхней половине слоя 2 (начиная с глубины 12.0 м) – солоноватоводного. При формировании слоя 3 водоем был несколько глубже и дельтовые рукава Сырдарьи были на значительном удалении, при формировании слоя 2 периодически возникали мелководно-болотные обстановки, в том числе в верхней половине слоя – морское солоноватоводное мелководье. Слой 3 отражает начальную стадию наполнения Аральской котловины речными водами. О времени этого события можно судить по трем полученным ¹⁴C (AMS) датам по общему органическому углероду (TOC), cal BP: 22870 ± 140 (глубина 15.3 м), 24870 ± 130 (16.15 м) и 23580 ± 150

(21.0 м). Таким образом, начало поступления пресных вод в Аральскую котловину и связанную с ним первую пресноводную фазу развития современного Аральского моря можно относить ко времени 23-25 тыс.л.н. Однако, учитывая, что даты получены по ненадежному материалу (ТОС, содержание C_{org} в осадке 0.4-0.5%) эту оценку возраста следует считать предварительной. Более надежная оценка будет сделана позднее с учетом ожидаемых результатов ОСЛ-датирования.

Благодарности

Полевые работы, литологические анализы, датирование выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект РНФ 22-17-00259. Палинологический и диатомовый анализы выполнены в рамках темы госзадания Института озероведения РАН № FFZF-2024-0002 (А.В.Лудикова, Т.В.Сапелко).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гуськов С. А., Жаков Е. Ю., Кузьмин Я. В. и др. 2011. Новые данные по истории Аральского моря и его связи с Западно-Сибирской равниной в голоцене. Доклады Академии наук 437 (6): 789–792.

Кесь А.С. 1991. Естественная история Аральского моря и Приаралья. Известия РАН. Сер. геогр. 4: 36-46.

Маев Е.Г., Маева С.А., Николаев С.Д. и др. 1983. Разрез донных отложений центральной части Аральского моря. Палеогеография Каспийского и Аральского морей в кайнозое. Ч. 2. Москва: МГУ, с. 119-133.

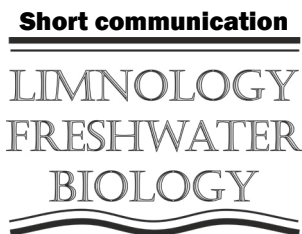
Boomer I. 2012. Ostracoda as indicators of climatic and human-influenced changes in the late quaternary of the pon-to-caspian region (aral, caspian and black seas). In: Horne, D.J., Holmes, J., Rodriguez-Lazaro, J., Viehberg, F.A. (Eds.), Ostracoda as Proxies for Quaternary Climate Change. Elsevier Science, Amsterdam, pp. 205-215.

Burr G.S., Krivonogov S.K., Gusskov S.A. et al. 2019. A history of the modern Aral Sea (Central Asia) since the Late Pleistocene. Quaternary Science Reviews 206: 141–149.

Cretaux J.-F., Letolle R., Berge-Nguyen M. 2013. History of Aral Sea level variability and current scientific debates. Glob. Planet. Change 110: 99-113.

Krivonogov S.K., Kuzmin Y.V., Burr G.S. et al. 2010. Environmental changes of the Aral Sea (central Asia) in the Holocene: major trends. Radiocarbon 52: 555-568.

Paleoecological reconstruction of water level changes in a cascade of lakes on Lunkulansaari Island (Lake Ladoga) based on the analysis of Cladocera remains in lake sediments



Pastukhova Yu.A.^{1*}, Tsyganov A.N.¹, Sapelko T.V.², Mazei N.G.¹, Zharov A.A.³, Mazei Yu.A.¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

² Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Sevastyanova, 9, St. Petersburg, 196105, Russia

³ A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Leninskiy ave. 33, Moscow 119071, Russia

ABSTRACT. In this study we investigate the dynamics of Cladocera subfossil assemblages (taphocenoses) during the formation of the cascade of three lakes located on the island of Lunkulansaari in the northeastern part of Lake Ladoga in the late Holocene. Since the last regression of Lake Ladoga and the formation of the lake cascade, Cladocera subfossil assemblages began to accumulate in bottom sediments. Their species structure was alternately dominated by species typical for aquatic vegetation in the littoral zone or species that prefer to live in open water. The data obtained allowed to reconstruct changes in lakes' water levels and clarify the stages of their development, previously revealed on the basis of pollen spectra of aquatic vegetation.

Keywords: Lake Ladoga, island lakes, lake sediments, Cladocera, paleoecological reconstruction

For citation: Pastukhova Yu.A., Tsyganov A.N., Sapelko T.V., Mazei N.G., Zharov A.A., Mazei Yu.A. Paleoecological reconstruction of water level changes in a cascade of lakes on Lunkulansaari Island (Lake Ladoga) based on the analysis of Cladocera remains in lake sediments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 574-579. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-574

1. Introduction

Lacustrine sediments are valuable source of information which is necessary for reconstructing long-term climatic changes and patterns of water-body formation. The remains of various indicator organisms are preserved in sediments and most of them can be identified to species level. One of the most abundant taphocenoses are formed by remains of cladocerans (Cladocera), which are actively used in paleolimnological studies as indicators that are sensitive to environmental changes. The aim of the study was to reconstruct the water level dynamics in three lakes of different ages, formed as a result of the regression of Lake Ladoga, based on the results of cladoceran analysis.

2. Materials and methods

Three sediment cores of the lakes Kuikkalampi (N 61.30304°, E 31.86677°, area 12000 m², maxi-

mum depth 2.8 m), Sokkasenlampi (N 61.30741°, E 31.836315°, area 1450 m², maximum depth 2.0 m), Hovatanlampi (N 61.32059°, E 31.81434°, area 161 000 m², maximum depth 2.5 m), located on the Lunkulansaari island in the northeastern part of Lake Ladoga were sampled. The cores were collected within the frameworks of paleolimnological research of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences in the summer of 2017 (Sapelko et al., 2018a). The island is extended from northwest to southeast for 17.2 km, the maximum width is 4.1 km. The lakes are located on an altitude gradient (the modern water edge in Lake Kuikkalampi is 17 m a.s.l., Sokkasenlampi – 14 m a.s.l. and Hovatanlampi – 10 m a.s.l.) and differ in the age of formation since they were formed as a result of the progressive regression of Lake Ladoga. The current water level in Lake Ladoga is 5 m a.s.l., with the estimated maximum level during the last transgression during the Middle Holocene being about 21 m a.s.l. (Sapelko et al., 2018b). At present, these lakes are shal-

*Corresponding author.

E-mail address: yuliya.pastukhova.98@mail.ru (Yu.A. Pastukhova)

Received: June 12, 2024; Accepted: July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



low overgrowing water bodies with aquatic vegetation peculiar for this area of Ladoga, which varies depending on the depth and overgrowing stage (Gazizova and Sapelko, 2020). Bottom sediment cores were sampled at depths of 288–325 cm in Lake Kuikkalampi, 145–245 cm in the Lake Sokkasenlampi and 208–340 cm in the Lake Hovatanlampi (from the water surface). The cores were cut into 2 cm (in thickness) samples. Cladoceran analysis of sediments was carried out at 2 cm intervals. The age of sediments was determined by radiocarbon dating using accelerator mass spectrometry (AMS ^{14}C) (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), and calibrated with the use of the IntCal20 calibration curve. Age estimates are given in calibrated years before present (cal yr BP).

3. Results and discussion

The cladoceran taphocoenoses in the bottom sediments of lakes Kuikkalampi, Sokkasenlampi and Hovatanlampi were represented by four families: Bosminidae, Chydoridae, Euryercidae and Sididae. In total, 11 Cladocera species were identified in Lake Kuikkalampi, 17 in Lake Sokkasenlampi and 20 in Lake Hovatanlampi. The subfossil cladoceran assemblages in each lake changed several times during their development. In general, phytophilic species (*Chydorus sphaericus* sensu lato, *Alonella nana* (Baird, 1850)) predominated, with a significant proportion of pelagic species (*Bosmina coregoni* (Baird, 1857) and *Bosmina longirostris* (O. F. Muller, 1776)). At the same time, the abundance of pelagic taxa periodically declined to almost complete extinction.

Based on the species structure of subfossil Cladocera assemblages, three zones can be distinguished (CL1: 3205–2680 cal yr BP, CL2: 2680–2220 cal yr BP, CL3: 2220 cal yr BP – present), which are generally consistent with previously proposed biostratigraphy based on pollen spectra of aquatic plants (Gazizova and Sapelko, 2020).

In Zone CL1 (3205–2680 cal BP) Ladoga regression occurred, which led to successive formation of lakes Kuikkalampi, Sokkasenlampi and Hovatanlampi. During this period, cladoceran taphocoenoses began to form in the former two lakes. Cladocera remains there were represented mainly by an eurybiont *Chydorus sphaericus* s.l. and pelagic *Bosmina coregoni* and *B. longirostris*.

In Zone CL2 (2680–2220 cal yr BP) in Lake Sokkasenlampi the share of pelagic *B. coregoni* and *B. longirostris* was initially low, but by the end of the period the representation of these species increased sharply, which apparently indicates an increase of water level. At the same time, an increase in the relative abundance of these pelagic taxa was observed in Lake Kuikkalampi, which also indicates a raise of water level. In Lake Hovatanlampi cladoceran taphocoenoses began to form only at the end of this stage (2320 cal yr BP) and were represented mainly by littoral and thicket species. This coincides with the beginning of the formation of aquatic vegetation in this water body according to pollen analysis (Gazizova and Sapelko, 2020). The

concentration of Cladocera remains in the corresponding layers of sediments was low, which is probably due to the low trophic level of the water body. It is also possible that during this period the pelagic zone of the Lake Hovatanlampi was occupied by daphniids, remains of which may not have been preserved in the sediments. Since 2262 cal yr BP pelagic species *B. coregoni* and *B. longirostris* increased their abundance, indicating a formed pelagic zone.

In Zone CL3 (2220 cal yr BP–present), as Lake Kuikkalampi further developed, remains of phytophilous Cladocera become more abundant. This indicates an increase in the areas occupied by macrophyte thickets. Around 2070 cal yr BP the total abundance of Cladocera remains in the sediments decreased, and the proportion of acidophilic *A. nana* reached 80% of the total abundance, which indicates significant acidification of the lake water. At the same time, the disappearance of pelagic taxa (*Bosmina*) was observed, the remains of which were further absent almost to the top layers of bottom sediments. Taken together, it indicates the decrease of water level in the lake and its overgrowth.

In Lake Sokkasenlampi in the period 2010–1530 cal yr BP the relative abundance of benthic *Alona quadrangularis* significantly increased, while the number of phytophilic species decreased. This is likely reflecting a decrease in the macrophyte abundance in the littoral zone, which, in turn, may be a consequence of water humification and narrowing of the photic zone. At 1530 cal yr BP a decrease in the total concentration of Cladocera remains in the sediments took place, associated with the absence of pelagic taxa. After that, the littoral species occupied a significant share of the cladoceran taphocoenoses; *Ch. sphaericus* s.l. and the acidophilic species *A. nana* predominated, which indicates a water pH below neutral.

In Lake Hovatanlampi in the period 2180–1920 cal yr BP a decrease in the proportion of pelagic cladoceran taxa and an increase in the eurytopic *C. sphaericus* s.l. abundance was observed. Subsequently, three episodes of increased abundance of pelagic species took place in this lake: at 1850–1780 cal yr BP, 1500–1390 cal yr BP, and from 1210 cal yr BP to the present. During these periods, a predominance of *C. sphaericus* s.l. was observed, which probably indicates a decrease in water level.

4. Conclusions

Recently all three lakes are shallow overgrown water bodies. A significant abundance in the subfossil Cladoceran assemblages in all three lakes is represented by eurybiont and eurytopic *Chydorus sphaericus* s.l. Lakes Kuikkalampi and Sokkasenlampi have a more even relative distribution of species abundances, but 70 and 95% of them (respectively) are littoral taxa. A different situation is observed in Lake Hovatanlampi where 55% of the cladoceran remains represented by pelagic *Bosmina*.

Acknowledgements

The study was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 24-14-00065, <https://rscf.ru/project/24-14-00065/>). The authors are grateful to Ding Ping and Kitashov A.V. for help with radiocarbon dating of sediment samples.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

References

Gazizova T.Yu., Sapelko T.V. 2020. Substantiation of the importance of macrophyte pollen for paleolimnological reconstructions on the example of the lakes on Lunkulansaari Island (northeast of Lake Ladoga). *Biosphere* 12(4): 231–241 (in Russian)

Sapelko T.V., Terekhov A.V., Gazizova T.Yu. et al. 2018a. Paleolimnology of Lunkulansaari Island, Lake Ladoga: preliminary results. In: *Freshwater ecosystems – modern challenges. Abstracts of the International Conference in Irkutsk in September 10-14: 10–14.* (in Russian)

Sapelko T.V., Terekhov A.V., Amantov A.V. 2018b. Ladoga transgression: reconstruction of the final stage and subsequent decline in the northern part of the lake. *Regional Geology and Metallogeny* 75: 23–34 (in Russian)

Палеоэкологическая реконструкция изменения уровня воды в каскаде озер на острове Лункулансаари (Ладожское озеро) по результатам кладоцерного анализа



Пастухова Ю.А.^{1*}, Цыганов А.Н.¹, Сапелко Т.В.², Мазей Н.Г.¹,
Жаров А.А.³, Мазей Ю.А.¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, ул. Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

² Институт озероведения РАН – СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия

³ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, ул. Ленинский проспект, 33, Москва, 119071, Россия

АННОТАЦИЯ. В исследовании показана динамика тафокомплексов кладоцер в процессе формирования каскада из трех озер, расположенных на острове Лункулансаари в северо-восточной части Ладожского озера в позднем голоцене. С момента последней регрессии Ладожского озера и образования каскада озер, в донных отложениях начали накапливаться тафокомплексы кладоцер, в видовой структуре которых поочередно преобладали литорально-зарослевые виды или виды, предпочитающие обитать в открытой воде. Полученные данные позволили реконструировать изменения уровня воды и уточнить этапы развития изучаемых водоемов, отмеченные при изучении спорово-пыльцевых спектров.

Ключевые слова: Ладожское озеро, островные озера, донные отложения, Cladocera, палеоэкологическая реконструкция

Для цитирования: Пастухова Ю.А., Цыганов А.Н., Сапелко Т.В., Мазей Н.Г., Жаров А.А., Мазей Ю.А. Палеоэкологическая реконструкция изменения уровня воды в каскаде озер на острове Лункулансаари (Ладожское озеро) по результатам кладоцерного анализа // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 574-579. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-574

1. Введение

Донные отложения озер служат ценным источником информации, необходимой для реконструкции долгосрочных климатических изменений и закономерностей формирования водоемов. В них сохраняются остатки индикаторных организмов, большинство из которых могут быть идентифицированы до вида. Одни из наиболее богатых тафокомплексов в озерных отложениях формируют ветвистоусые ракообразные (Cladocera), которые активно используются в подобных исследованиях в качестве биоиндикаторов, чувствительных к изменениям условий среды их обитания. Цель работы – реконструировать динамику уровня воды трех разновозрастных озер, образовавшихся в результате регрессии Ладожского озера, по результатам кладоцерного анализа.

2. Материалы и методы

Для исследования отбирали донные отложения трех озер Куйккалампи (N 61.30304°, E 31.86677°, площадь 12 тыс. м², максимальная глубина 2,8 м), Соккасенлампи (N 61.30741°, E 31.836315°, площадь 1.45 тыс. м², максимальная глубина 2,0 м), Ховатанлампи (N 61.32059°, E 31,81434°, площадь 161 тыс. м², максимальная глубина 2,5 м), расположенных на острове Лункулансаари в северо-восточной части Ладожского озера. Отбор отложений проведен в рамках палеолимнологических исследований Института озероведения РАН летом 2017 года (Сапелко и др., 2018а). Остров вытянут с северо-запада на юго-восток на 17,2 км, максимальная ширина составляет 4,1 км. Озера расположены на градиенте высот в рельефе (современный урез воды в озере Куйккалампи – 17 м, Соккасенлампи – 14 м и Ховатанлампи – 10 м) и отличаются возрастом

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: yuliya.pastukhova.98@mail.ru (Ю.А. Пастухова)

Поступила: 12 июня 2024; **Принята:** 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



формирования так как образовались в результате регрессии Ладожского озера. Современный уровень воды в Ладожском озере – составляет 5 м, при предположительном максимальном уровне в ходе последней трансгрессии в течение среднего голоцена около 21 м (Сапелко и др., 2018b). В настоящее время озера представляют собой мелководные зарастающие водоемы со свойственной данному району Ладоги водной растительностью, различающейся в зависимости от глубины, площади и стадии зарастания (Газизова и Сапелко, 2020). Керны донных отложений отобраны на глубинах 288-325 см в оз. Куйккалампи, 145-245 см в оз. Соккасенлампи и 208-340 см в оз. Ховатанлампи. Отложения разрежали на последовательные образцы по 2 см. Кладоцерный анализ донных отложений озер проводили с интервалом 2 см. Возраст отложений определяли с помощью радиоуглеродного датирования методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS ^{14}C) (Институт геохимии Гуанчжоу Китайской академии наук) и калибровали с использованием калибровочной кривой IntCal20. Оценки возраста в работе приводятся в виде калиброванных лет назад (кал.л.н.).

Результаты и обсуждение

Тафокомплекс кладоцер в донных отложениях озер Куйккалампи, Соккасенлампи и Ховатанлампи представлен четырьмя семействами: *Bosminidae*, *Chydoridae*, *Eurycercidae* и *Sididae*. Всего идентифицировано 11 таксонов *Cladocera* в озере Куйккалампи, 17 – в озере Соккасенлампи и 20 – в озере Ховатанлампи. Тафокомплексы кладоцер каждого из исследуемых озер на протяжении их развития неоднократно менялись. В целом, преобладали фитофильные виды (*Chydorus sphaericus sensu lato*, *Alonella nana* (Baird, 1850)), со значительной долей пелагических видов (*Bosmina coregoni* (Baird, 1857) и *Bosmina longirostris* (O. F. Muller, 1776)). При этом для пелагических видов отмечаются с периодические снижения численности вплоть до полного исчезновения.

По видовой структуре тафокомплексов кладоцер в отложениях озер можно выделить три зоны (CL1: 3200–2680 кал.л.н., CL2: 2680–2220 кал.л.н., CL3: 2220 кал.л.н. – настоящее время), которые в целом согласуются с ранее предложенной био-стратиграфией на основании пыльцевых спектров водных растений (Газизова и Сапелко, 2020).

В зоне CL1 (3205–2680 кал.л.н. кал. л.н.) происходила регрессия Ладоги, повлекшая последовательное образование озер Куйккалампи, Соккасенлампи и Ховатанлампи. В этот период начали формироваться тафокомплексы кладоцер в первых двух озерах, остатки кладоцер в которых были представлены в основном комплексом эврибионтных фитофильных видов *Ch. Sphaericus* s.l. и пелагическими *B. coregoni* и *B. longirostris*.

В зоне CL2 (2680–2220 кал.л.н.), в озере Соккасенлампи доля пелагических *B. coregoni* и *B. longirostris* сначала была низкой, к концу периода представленность этих видов резко увеличивалась, что, вероятно, говорит о повышении уровня воды.

В это же время в озере Куйккалампи наблюдалось стабильное увеличение относительного обилия этих пелагических таксонов, что так же указывает на подъем уровня воды. В озере Ховатанлампи тафоценозы кладоцер в отложениях начали формироваться только в конце этого этапа (2320 кал.л.н.) и были представлены в основном литоральными и зарослевыми видами. Это совпадает с началом формирования водной растительности в этом водоеме по данным спорово-пыльцевого анализа (Газизова и Сапелко, 2020). Концентрация остатков кладоцер при этом была незначительной, что, вероятно, связано с низкой трофностью водоема. Вскоре 2262 кал.л.н. начали преобладать пелагические виды *B. coregoni* и *B. longirostris*, что указывает на сформированную пелагиаль.

В зоне CL3 (2220 кал.л.н. – настоящее время) по мере дальнейшего развития озера Куйккалампи остатки фитофильных таксонов становятся более обильными. Это свидетельствует об увеличении площадей, занятых макрофитами. 2070 кал.л.н. обилие остатков кладоцер снизилось, доля ацидофильной *A. nana* достигла 80%, что указывает на значительное закисление воды. В то же время наблюдалось исчезновение пелагических видов кладоцер рода *Bosmina*, остатки которых далее отсутствовали практически до самых верхних горизонтов донных отложений. В совокупности это создает картину обмеления и заболачивания озера.

В озере Соккасенлампи в период 2010–1530 кал.л.н. значительно повышается доля бентосной *Alona quadrangularis*, в то время как число фитофильных видов уменьшается. Это может быть связано со снижением обилия макрофитов в литорали. На глубине 170 см (1531 кал.л.н.) наблюдается снижение общей концентрации остатков кладоцер в отложениях и отсутствие остатков пелагических видов. С этого периода литорально-зарослевые виды начинают занимать значительную долю в тафокомплексе кладоцер, среди них преобладает *Ch. sphaericus* s.l. и ацидофильный вид *A. nana*, что указывает на pH воды ниже нейтральной.

В озере Ховатанлампи в период 2180-1920 кал.л.н. наблюдается понижение доли пелагических видов и повышение доли комплекса эвритопных видов *C. sphaericus* s.l. Впоследствии, в этом озере прослеживались три эпизода увеличения пелагических видов: 1850-1780 кал.л.н., 1500-1390 кал.л.н. и 1210 кал.л.н. – наст.вр. В промежутках наблюдалось преобладание остатков *C. sphaericus* s.l., что, вероятно, свидетельствовало о снижении уровня воды.

В настоящее время озера представляют собой мелководные зарастающие водоемы. Значительную долю в тафокомплексе кладоцер во всех трех озерах занимает *Chydorus sphaericus* s.l. В озере Куйккалампи и Соккасенлампи более выровненное относительное обилие видов, однако из них 70 и 95% (соответственно) приходится на литоральные и зарослевые. Иная картина наблюдается с озером Ховатанлампи, в донных отложениях которого 55% тафокомплекса кладоцер занимают пелагические виды.

3. Заключение

С момента последней регрессии Ладожского озера и образования каскада озер на острове Лункулансаари в донных отложениях начали накапливаться тафокомплексы кладоцер, в видовой структуре которых поочередно преобладали литорально-зарослевые виды и виды, предпочитающие открытую воду. Полученные данные позволили отследить изменение уровня воды и уточнить этапы развития изучаемых водоемов, отмеченные при изучении спорово-пыльцевых спектров.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-14-00065, <https://rscf.ru/project/24-14-00065/>). Авторы выражают благодарность Дине Пину и Киташову А.В. за помощь в проведении радиоуглеродного датирования образцов донных отложений.

Конфликт интересов

Авторы не заявляют конфликтов интересов.

Список литературы

Газизова Т.Ю., Сапелко Т.В. 2020. Обоснование значения пыльцы макрофитов для палеолимнологических реконструкций на примере озер острова Лункулансаари (северо-восток ладожского озера). *Биосфера* 12(4): 231-241

Сапелко Т.В., Терехов А.В., Газизова Т.Ю. и др. 2018. Палеолимнология острова Лункулансаари, Ладожское озеро: предварительные результаты. В кн.: Пресноводные экосистемы – современные вызовы. Тезисы Международной конференции. 10-14 сентября 2018. Иркутск, стр. 10-14.

Сапелко Т.В., Терехов А.В., Амантов А.В. 2018. Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера. *Региональная геология и металлогения* (75): 23-34.

Assessment of Holocene climate influence on hydrothermal regime of paleoecotopes within Ryams of the Baraba forest-steppe (southern Western Siberia)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Preis Yu.I.¹, Maltsev A.E.^{2*}, Leonova G.A.²

¹ Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Akademichesky ave., 10/3, Tomsk, 634055, Russia

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Akademika Koptyuga ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. A clearly defined trend of alterations in the properties of peat across the depth of the deposit has been observed in the two studied ryams of the Barabinsk forest-steppe. The changes in peat properties influenced by external factors outweigh those induced by autogenic development of the bog. In order to achieve an accurate reconstruction of changes in the water regimes of ryams, it is essential to consider that the properties of peats reflect not only the state of the water regime at the time of their deposition but also subsequent changes over time. Both peat sections exhibit a catastrophic transition from the eutrophic to the oligotrophic stage of development approximately 4100 and 1100 years ago.

Keywords: Ryam, peat, Holocene, climate, hydrothermal regime of bogs

For citation: Preis Yu.I., Maltsev A.E., Leonova G.A. Assessment of Holocene climate influence on hydrothermal regime of paleoecotopes within Ryams of the Baraba forest-steppe (southern Western Siberia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 580-587. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-580

1. Introduction

Considering the current limited comprehension of the Holocene climate's impact on modifications in the hydrothermal regime of paleoecotopes within bogs, it is necessary to assess the significance of methods for reconstructing water regimes using bioindicators. Traditionally in Russia, methods for reconstructing the hydrological regime of paleo-ecotopes include calculating humidification steps (HS) and index of wet (IW) based on the botanical composition of peat and ecological scales of bog plants (Ramensky et al., 1956; Elina and Yurkovskaya, 1992). Additional indicators include the decomposition degree of peat (DD), which depends on water table level and the time peat spends in aerobic conditions, as well as density and moisture content (MC), which are correlated with it. High water content of bogs corresponds to high values of HS, IW, MC and low — DD, density. In addition, the latest methods using highly sensitive indicators are widely used: N/C and H/C ratios in peat. The N/C ratio is an indicator of the humification process due to specific microbial activity in an anaerobic environment and the enrichment of peat with nitrogen-containing compounds of bacterial origin (Borgmark, 2005). The H/C ratio is an

indicator of the molecular complexity and aromaticity (Anderson and Hepburn, 1986). A decrease in N/C and H/C ratios indicates an increase in the degree of peat decomposition and vice versa.

2. Materials and methods

The study focused on Holocene peat profiles from the Ubinsky “burnt” Ryam (anthropogenically disturbed) and the Sherstobitovskiy Ryam, both located in the Baraba forest-steppe (Novosibirsk region). To validate methods for reconstructing the hydrological regime of paleo-ecotopes using traditional bioindicators, changes in the indicators IW, HS, DD, density, and MC were analyzed across the depth of the peat deposits in key sections of the Ryams (Fig. 1, 2). Additionally, correlation coefficients (r) were calculated between pairs of these indicators, as well as between these indicators and the depth of the peat deposit (depth). When calculations are performed for the entire profile, significant correlation coefficients often arise due to substantial differences in only some of the indicators. Therefore, calculations were conducted separately for layers of different peat types.

*Corresponding author.

E-mail address: maltsev@igm.nsc.ru (A.E. Maltsev)

Received: June 08, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



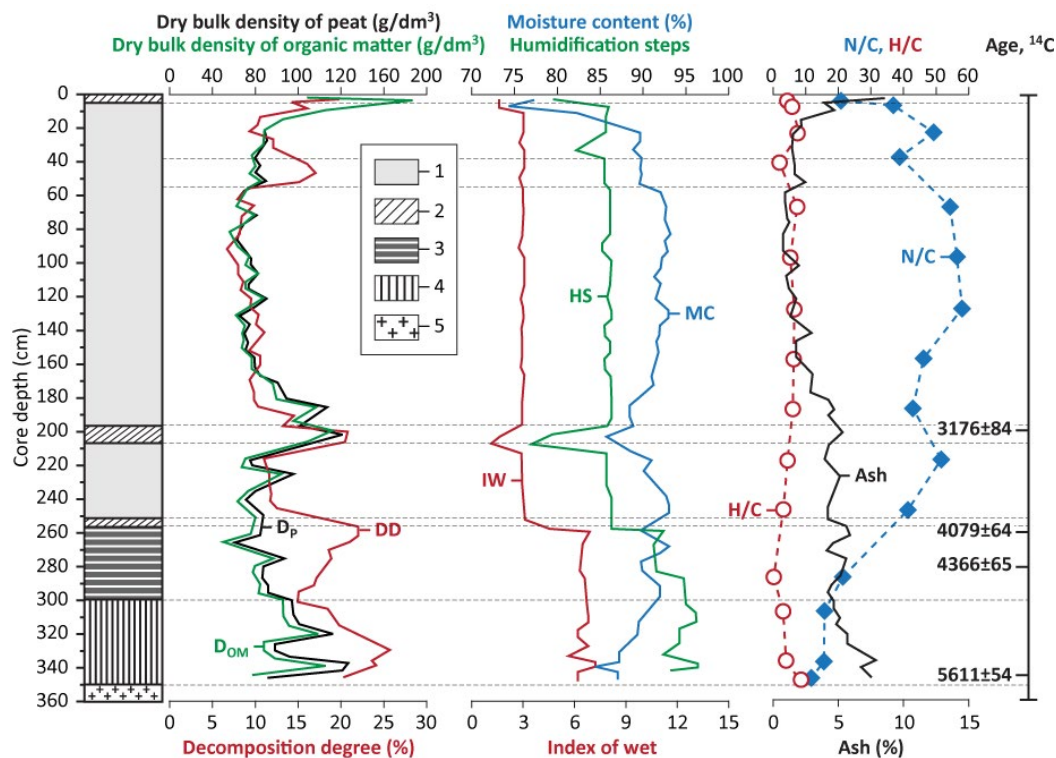


Fig. 1. Changes in the properties of peat and indicators of the water paleoregime of the Ubinsky “burnt” Ryam. 1. *Sphagnum fuscum* (upland peat), 2. woody remains, 3. *S. teres* and forbs, 4. reed, 5. organic-mineral deposits.

3. Results and discussion

For the fen peat (~350–260 cm) of the Ubinsky “burnt” Ryam, significant positive correlation coefficients were found between ash content and depth ($r = 0.62$) (Fig. 1). This correlation reflects the expected nutrient depletion in the mire as peat accumulates and plant root systems become disconnected from the mineral substrate. Additionally, the correlation between the density of organic matter (D_{OM}) and depth ($r = 0.62$) indicates a consistent decrease in density from the bottom to the top, highlighting a transition from a variable moisture regime to a more stable one and a shift from highly productive grass paleo-communities to sphagnum communities. Positive correlation coefficients between ash content and decomposition degree ($r = 0.70$) suggest that peatland fires coincided with periods of lowered water table levels. Significant negative correlation coefficients were observed for all properties and MC ($r = -0.66$ to -0.80). No significant correlation coefficients were found between all peat properties (including water paleoregime indicators) and IW, HS. This indicates that the initial dependence of peat DD, density, and MC on the water saturation level of the paleoecotope, and consequently on the species composition of paleo-communities, is substantially disrupted by secondary changes in the peat. Since this peat was deposited under high water table conditions (average IW = 6.5; average HS = 91.7), these disruptions are attributed to subsequent declines in the water table. This conclusion is supported by the pulsating nature of changes in DD.

For the raised peat (~260–0 cm), significant correlation coefficients were identified for all peat properties: ash content and depth ($r = 0.73$); ash and dry bulk

density of peat (D_p), D_{OM} ($r = 0.64, 0.56$); ash content and DD ($r = 0.64$); DD and D_p , D_{OM} ($r = 0.62, 0.68$); MC and DD, density, ash content ($r = -0.5$ to -0.67). This is due to the fairly good consistency of their changes along the depth of the peat. However, the indicators for all properties, except ash content, do not show significant dependence on the depth of the deposit (r and depth are not significant). Despite the clear trend of changing peat properties with depth, the variations in these properties due to external factors are more significant than those caused by the autogenic development of the bog. Significant correlation coefficients values were also obtained for raised peat properties and IW, HS (except ash content). This is attributed to the presence of two layers of woody peat, which sharply differ from the predominant fuscum-peats in terms of IW and HS indicators. When these layers are excluded from the calculations, the r values become insignificant.

For the fen peat (~250–70 cm) of the Sherstobitovskiy Ryam, significant correlation coefficients were obtained for ash content and depth ($r = 0.56$); D_p , D_{OM} and depth ($r = 0.74; 0.81$); as well as for ash content and D_p , D_{OM} ($r = 0.88, 0.72$) (Fig. 2). However, there was no significant correlation between ash content and decomposition degree of peat ($r = 0.03$). Excluding the values of ash content and DD in the 220–250 cm layer, composed of peats enriched with *Sphagnum teres* remains, results in a significant correlation coefficient ($r = 0.66$). The extremes in ash content are not associated with fires, as no evidence of them was found. Instead, they are linked to the upward movement of more mineralized waters due to active plant transpiration during arid periods. Unlike the Ubinsky “burnt” Ryam, a significant negative correlation coefficient was found only for MC and ash content

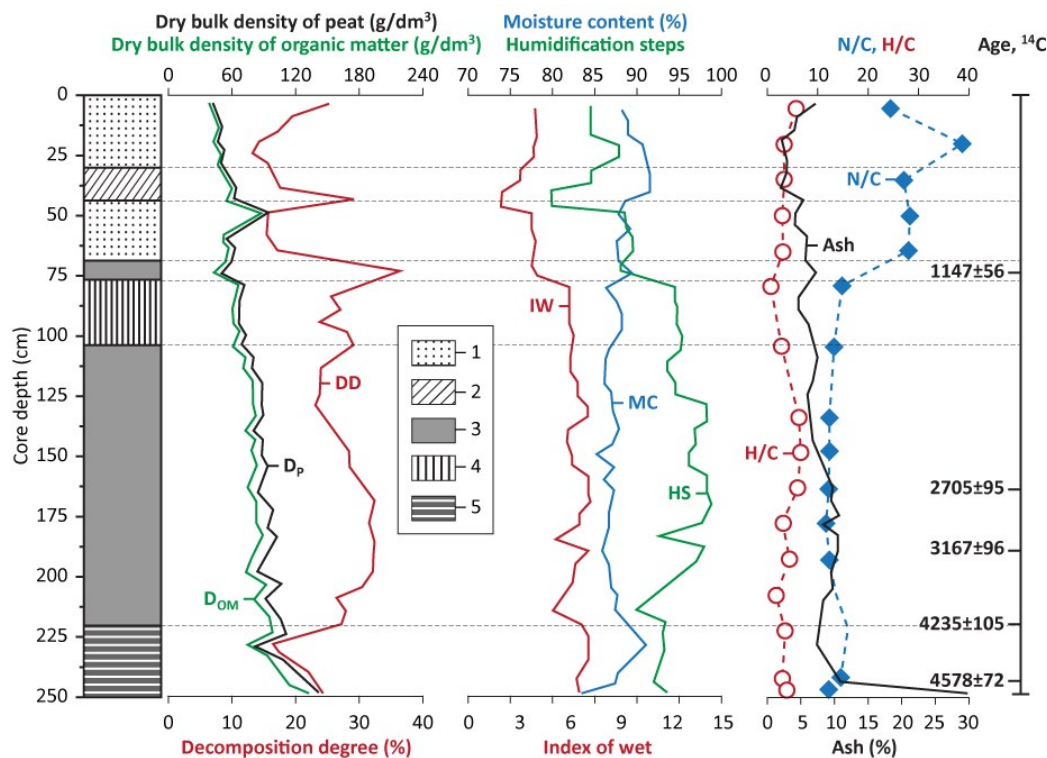


Fig.2. Changes in the properties of peat and indicators of the water paleoregime of the Sherstobitovskiy Ryam. 1. *Sphagnum magellanicum* (upland peat), 2. woody remains, 3. forbs, 4. reed, 5. *S. teres*.

($r = -0.52$). Similar to the Ubinsky “burnt” Ryam, no significant correlation coefficients were found for IW, HS, and all peat properties. Since these peats also accumulated under high water table conditions (average IW = 6.3; average HS = 94.9), the disruptions are likely due to subsequent water table declines, possibly during the regression periods of nearby lakes.

For the raised peat (~70–0 cm), significant correlation coefficients were identified only for the following pairs: D_p, D_{OM}, and depth ($r = 0.59, 0.57$), reflecting the systematic compaction of the peat after its deposition; ash content and DD ($r = 0.60$); and ash content and MC ($r = -0.89$), with the coordinated changes in the upper layer attributed to anthropogenic factors.

Thus, to obtain an objective reconstruction of the changes in the hydrological regimes of the mires in the Baraba forest-steppe, it is necessary to consider that the properties of peat indicate not only the state of the water regime at the time of their deposition but also its changes at later times.

Changes in the ratios N/C and H/C were analyzed along the depth profile of both sections (Fig. 1, 2), and their correlation coefficients were calculated. For the profiles of the Ubinsky “burnt” Ryam and the Sherstobitovskiy Ryam, significant correlation coefficients were obtained for the N/C ratio and the decomposition degree of peat ($r = -0.93$ and -0.82), as well as for the N/C ratio and the depth of the peat deposit ($r = -0.61$ and -0.76). This confirmed the high significance of the N/C ratio as an indicator of the paleohydrological regime of the Baraba ryams. In contrast, no significant correlation coefficients were found for the H/C ratio with the N/C ratio, DD, and depth. The low indicative significance of the H/C ratio is likely due to the fact that in poorly decomposed peats, this indicator

primarily depends on the botanical composition of the peat.

4. Conclusions.

In the sediment profiles of the Ubinsky “burnt” Ryam (anthropogenically disturbed) and the Sherstobitovskiy Ryam, both located in the Baraba forest-steppe (Novosibirsk region), there is an absence of features characteristic of autogenous oligotrophication, such as a gradual decrease in ash content, DD, and an increase in the content of oligotrophic plant remains. Both profiles of peat are characterized by a catastrophic transition from the eutrophic to the oligotrophic stage of development. This transgression of oligotrophic *Sphagnum* mosses was preceded by an increase in ash content and the decomposition degree of peat, caused by the drying and afforestation of the fen surface. This likely promoted the formation of perennial permafrost aquicludes during periods of dry cooling. The radiocarbon age of this transition (approximately 4100 and 1100 years ago) coincides with the end of global Holocene climate coolings, with maxima at 4500 and 1200 years ago, as well as the age of paleocryogenic processes in the peatlands of the forest zone of Western Siberia (Preis, 2015). These findings indicate the climatic determination of the oligotrophication of the studied mires.

Acknowledgements

The research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, Project No. 24-27-00061.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

Anderson H., Hepburn A. 1986. Variation of humic substances within peat profile, in: Fuchsman, C.H. (Ed.), *Peat and Water*, Academic Press, New York, pp. 177–194.

Borgmark A. 2005. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis. *Holocene*. 15 (3): 387–395. DOI: [10.1191/0959683605hl816rp](https://doi.org/10.1191/0959683605hl816rp)

Elina G.A., Yurkovskaya T.K. 1992. Methods for determining the paleohydrological regime as the basis for objectifying the causes of succession of swamp vegetation. *Botanical journal*. 77 (7): 120–124. (in Russian)

Preis Yu.I. 2015. Detailed reconstruction of the functional state of the swamp as a response to changes in the continental climate of the Holocene (middle taiga of Western Siberia). *News of Tomsk Polytechnic University*. 326 (2): 90–102. (in Russian)

Ramensky L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipov N.A. 1956. Ecological assessment of forage areas based on vegetation cover. *Selkhozgiz, Moscow*. 472 p. (in Russian)

Влияния климата голоцена на изменение гидротермического режима палеоэкотопов рямов Барабинской лесостепи (юг Западной Сибири)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПрейс Ю.И.¹, Мальцев А.Е.^{2*}, Леонова Г.А.²¹ Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический пр., 10/3, Томск, 634055, Россия² Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С. СО РАН, пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Не смотря на достаточно хорошо выраженную общую тенденцию изменения свойств торфа по глубине залежи, изменение их под влиянием внешних факторов более существенно, чем обусловленное аутогенным развитием болота. В связи со значительным участием в залежах торфов с вторично измененными свойствами, для получения объективной реконструкции изменения водных режимов рямов Барабинской лесостепи необходимо учитывать, что свойства торфов индицируют состояние водного режима не только в момент их отложения, но и его изменение в более позднее время.

Ключевые слова: Рямы, торф, голоцен, климат, гидротермический режим

Для цитирования: Прейс Ю.И., Мальцев А.Е., Леонова Г.А. Влияния климата голоцена на изменение гидротермического режима палеоэкотопов рямов Барабинской лесостепи (юг Западной Сибири) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 580-587. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-580

1. Введение

В связи со слабой изученностью влияния климата голоцена на изменение гидротермического режима палеоэкотопов болот, формирующихся в условиях континентального климата голоцена Западной Сибири, и особенно рямов Барабинской лесостепи, находящихся на южном пределе их распространения, необходима валидация методов реконструкции водных режимов даже по традиционным биоиндикаторам, то есть оценка значимости этих индикаторов.

Традиционно в России для реконструкции водного режима палеоэкотопов используются методы расчета ступени увлажнения (СУ) и индекса влажности (IW) по ботаническому составу торфа и экологическим шкалам болотных растений (Раменский и др., 1956; Елина и Юрковская, 1992). В качестве дополнительных индикаторов принимают степень разложения (R) торфа, зависящую от уровня болотных вод (УБВ) и времени нахождения торфа в аэробных условиях, а также коррелятивно связанные с ней плотности (P) и естественной влажности ($W_{ест}$). Высокой обводненности болот соответствуют высокие значения СУ и IW, $W_{ест}$, низкие — R, P. Кроме того, за рубежом широко использу-

ются новейшие методы с применением высокочувствительных индикаторов: отношения C/N и C/H в торфе. Отношение C/N считается хорошим индикатором процесса гумификации из-за специфической микробной активности в анаэробной, кислой среде и обогащения торфяной массы азотсодержащими соединениями бактериального происхождения (Borgmark, 2005). Уменьшение отношения C/N указывает на увеличение разложения торфа и наоборот. Отношение C/H является показателем молекулярной сложности и в то же время ароматичности (Anderson and Herburn, 1986). Уменьшение отношений H/C указывает на увеличение разложения торфа и наоборот.

2. Материалы и методы

Объектами исследования стали голоценовые разрезы торфа Убинского горелого (антропогенно нарушенного) и Шерстобитовского рямов, расположенных в Барабинской лесостепи (Новосибирская область). Для валидации методов реконструкции водного режима палеоэкотопов по традиционным биоиндикаторам были проанализированы изменения показателей IW, СУ, R, P, $W_{ест}$ по глубине зале-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: maltsev@igm.nsc.ru (А.Е. Мальцев)

Поступила: 08 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



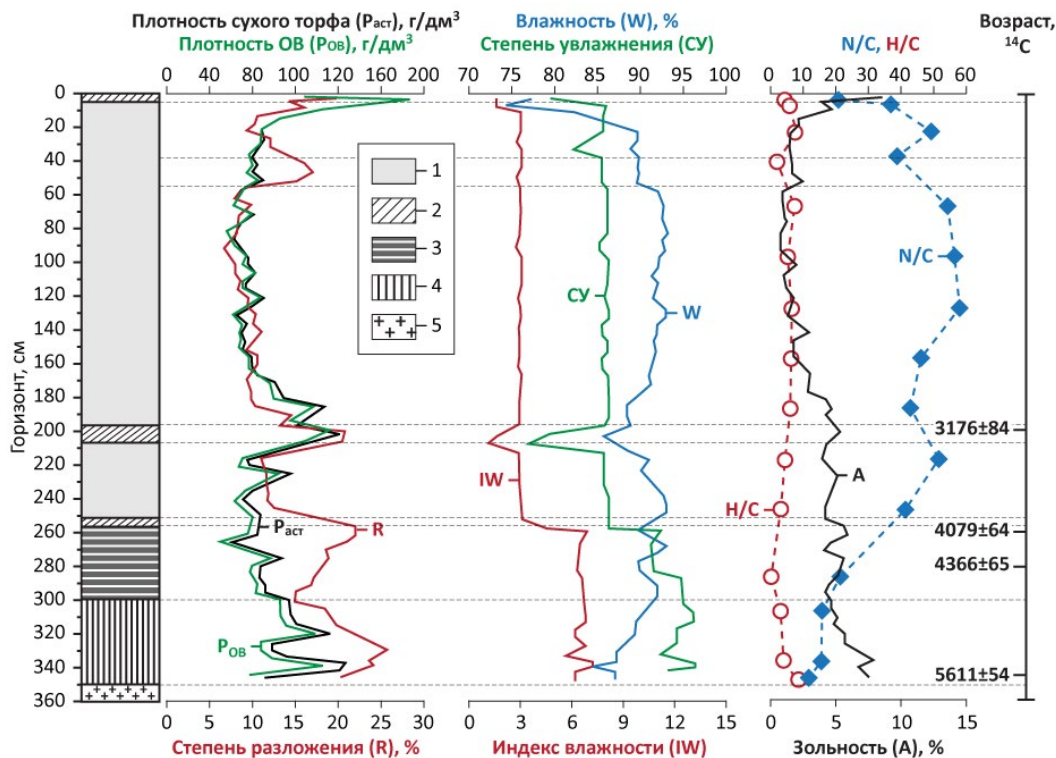


Рис.1. Изменение свойств торфа и индикаторов водного палеорежима Убинского горелого яма. 1. *Sphagnum fuscum* (верховой торф), 2. древесные остатки, 3. *S. teres* и разнотравье, 4. тростник, 5. органо-минеральные отложения.

жей ключевых участков ямов (Рис. 1, 2) и расчеты коэффициентов корреляции (r) между парами всех этих показателей, а также между этими показателями и глубиной торфяной залежи (h). При расчете для всей залежи часто получаются значимые коэффициенты корреляции из-за значительных различий лишь некоторых показателей. Поэтому расчёты проведены отдельно для слоев торфов разного типа.

3. Результаты и обсуждения

Для слоя низинных торфов (~350–260 см) Убинского горелого яма получены значимые положительные коэффициенты корреляции зольности (A) и h ($r = 0.62$) (Рис. 1). Это отражает закономерное обеднение питания по мере отложения торфов и отрыва корневых систем растений от минерального дна. Плотность органического вещества торфа (P_{OM}) и h ($r = 0.62$) показывает закономерное уменьшение плотности от дна вверх. Что отражает смену переменного режима увлажнения более стабильным режимом и смену высокопродуктивных травяных палеосообществ сфагновыми сообществами. Положительные коэффициенты корреляции A и R ($r = 0.70$) показывают совпадение болотных пожаров с периодами понижения УБВ. Получены значимые отрицательные коэффициенты корреляции всех свойств и $W_{ест}$ ($r = -0.66 \dots -0.80$). Отсутствуют значимые коэффициенты корреляции всех свойств торфа (в том числе индикаторов водного палеорежима) и IW , SU . То есть исходная зависимость R , P , $W_{ест}$ торфа от степени обводненности палеозотопа, а соответственно и от видового состава палеосообществ, значительно нарушена вторичными измене-

ниями торфов. Поскольку этот торф отлагался при высоких УБВ ($IW_{cp} = 6.5$; $SU_{cp} = 91.7$) данные нарушения обусловлены последующими понижениями УБВ. Это подтверждается пульсирующим характером изменения R .

Для слоя верховых торфов (~260–0 см) значимые коэффициенты корреляции выявлены для всех свойств торфа: A и h ($r = 0.73$); A и плотности абсолютно сухого торфа (P_{act}), P_{ov} ($r = 0.64, 0.56$); A и R ($r = 0.64$); R и P_{act} , P_{ov} ($r = 0.62, 0.68$); $W_{ест}$ и R , P , A ($r = -0.5 \dots -0.67$). Это связано с достаточно хорошей согласованностью их изменений по глубине залежи. При этом показатели всех свойств (за исключением A) не зависят от глубины залежи (r и h не значимы). Не смотря на хорошо выраженную тенденцию изменения свойств торфа по глубине залежи, изменение их свойств под влиянием внешних факторов более существенно, чем обусловленное аутогенным развитием болота. Получены значимые r свойств верхового торфа (за исключением A) и IW , SU . Однако это обусловлено наличием 2-х прослоек древесного торфа, резко отличающихся от преобладающих фускум-торфов по показателям IW и SU . При исключении этих прослоек из расчетов, r становятся не значимыми.

Для слоя низинных торфов (~250–70 см) Шерстобитовского яма получены значимые коэффициенты корреляции A и h ($r = 0.56$); P_{act} , P_{ov} и h ($r = 0.74; 0.81$); а также для A и P_{act} , P_{ov} ($r = 0.88, 0.72$), но отсутствуют для A и R ($r = 0.03$) (Рис. 2). Однако при исключении значений A и R в слое 220–250 см, сложенных торфами, обогащенными остатками *Sphagnum teres*, коэффициент корреляции становится значимым ($r = 0.66$). Экстремумы A связаны не с пожарами, так как их следы не

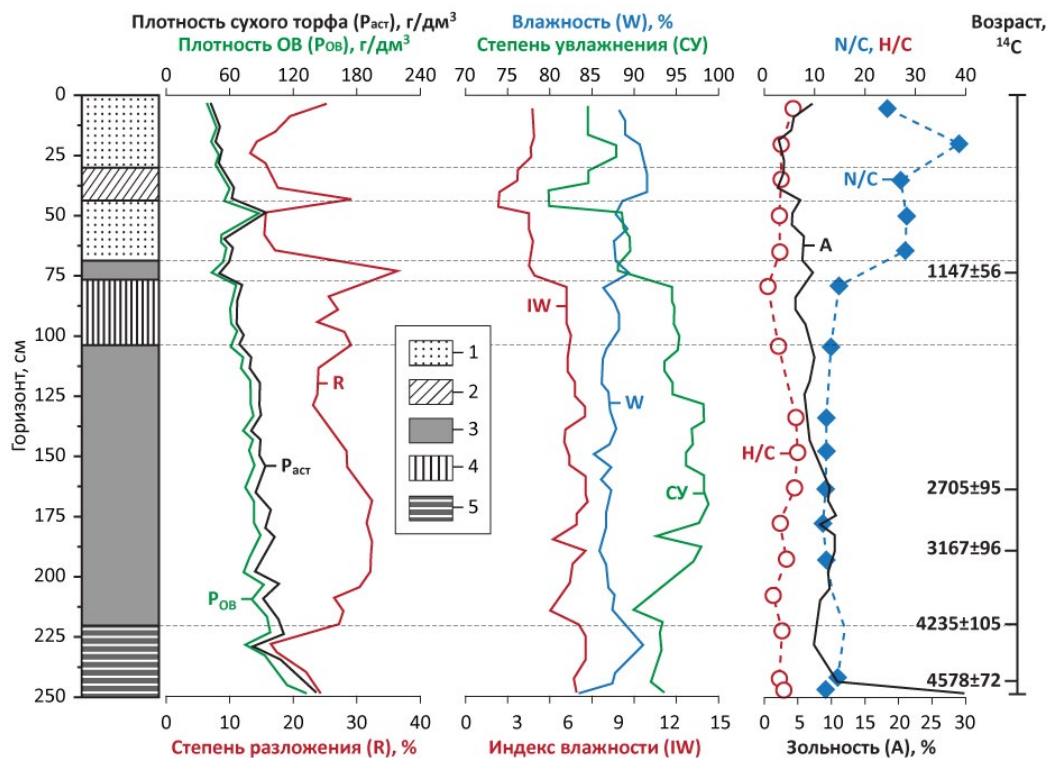


Рис.2. Изменение свойств торфа и индикаторов водного палеорежима Шерстобитовского рьяма. 1. *Sphagnum magellanicum* (верховой торф), 2. древесные остатки, 3. разнотравье, 4. тростник, 5. *S. teres*.

были обнаружены, а с подтягиванием более минерализованных вод в связи с активной транспирацией растениями в аридные периоды. В отличие от Убинского горелого рьяма значимый отрицательный коэффициент корреляции получен только для $W_{\text{ест}}$ и A ($r = -0.52$). Значимые значения коэффициента корреляции для IW , SU и всех свойств торфа, как и на Убинском горелом рьяме, отсутствуют. Поскольку эти торфа также отлагались при высоких УБВ ($IW_{\text{ср}} = 6.3$; $SU_{\text{ср}} = 94.9$), нарушения обусловлены их последующими понижениями вероятнее всего в периоды регрессии соседних озер.

Для слоя верховых торфов (~70–0 см) значимые коэффициенты корреляции выявлены только для: P_{act} , P_{ov} и h ($r = 0.59, 0.57$), отражающие закономерное уплотнение торфов после их отложения; A и R ($r = 0.60$); A и $W_{\text{ест}}$ ($r = -0.89$), согласованное изменение которых в верхнем слое обусловлено антропогенными факторами.

Таким образом, для получения объективной реконструкции изменения водных режимов рьямов Барабинской лесостепи необходимо учитывать, что свойства торфов индицируют состояние водного режима не только в момент их отложения, но и его изменение в более позднее время.

Были проанализированы изменения показателей биоиндикаторов — отношений N/C , H/C по глубине залежи обоих разрезов (Рис. 1, 2) и рассчитаны коэффициенты их корреляции. Для разрезов Убинского горелого и Шерстобитовского рьямов получены значимые коэффициенты корреляции отношения N/C и степени разложения ($r = -0.93$ и -0.82), а также отношения N/C и глубины залежи ($r = -0.61$ и -0.76). Это подтвердило высокую зна-

чимось отношения N/C , как индикатора водного палеорежима рьямов Барабы. В тоже время значимые коэффициенты корреляции отношения H/C и отношения N/C , R , h отсутствуют. Низкая индикаторная значимость отношения H/C вероятнее всего обусловлена тем, что в слаборазложившихся торфах значение данного показателя зависит, прежде всего, от ботанического состава торфа.

4. Заключение

В разрезах отложений Убинского горелого (антропогенно нарушенного) и Шерстобитовского рьямов, расположенных в Барабинской лесостепи (Новосибирская область), выявлено отсутствие признаков, характерных для аутогенной олиготрофизации: постепенного уменьшения показателей зольности, R торфов и возрастания содержания остатков олиготрофных видов растений. Для обоих разрезов характерен катастрофический переход с эвтрофной на олиготрофную стадию развития. При этом, трансгрессии олиготрофных сфагновых мхов предшествовало увеличение A и R торфов, вызванное обсыханием и облесением поверхности низинного болота, что должно было благоприятствовать появлению многолетнемерзлых водоупоров в периоды сухих похолоданий. Радиоуглеродный возраст этого перехода (около 4100 и 1100 л. н.) совпадает с возрастом окончания глобальных похолоданий климата голоцена с максимумами 4500 и 1200 л. н. и с возрастом палеокриогенных процессов на болотах лесной зоны Западной Сибири (Прейс, 2015). Все это свидетельствует о климатической обусловленности олиготрофизации изученных болот.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 24-27-00061.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Елина Г.А., Юрковская Т.К. 1992. Методы определения палеолимнологического режима как основа объективизации причин сукцессий растительности болот. *Ботанический журнал*. 77 (7): 120–124.

Прейс Ю.И. 2015. Детальная реконструкция функционального состояния болота как отклик на изменения континентального климата голоцена (средняя тайга Западной Сибири). *Известия Томского политехнического университета*. 326 (2): 90–102.

Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипов Н.А. 1956. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз. 472 с.

Anderson N., Hepburn A. 1986. Variation of humic substances within peat profile, in: Fuchsman, C.H. (Ed.), *Peat and Water*, Academic Press, New York, pp. 177–194.

Borgmark A. 2005. Holocene climate variability and periodicities in south-central Sweden, as interpreted from peat humification analysis. *Holocene*. 15 (3): 387–395. DOI: [10.1191/0959683605hl816rp](https://doi.org/10.1191/0959683605hl816rp)

The influence of palaeo-fire activity on the dynamics of vegetation cover in the piedmont of Northern Altai for the past 16000 years

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYPupysheva M.A.^{1*}, Blyakharchuk T.A.^{1,2}¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Akademicheskoy av., 10/3, Tomsk, 634055, Russia²Tomsk State University, Lenin av., 36, Tomsk, 634050, Russia

ABSTRACT. This work presents results of reconstructing dynamics of palaeo-fires in the piedmont of Northern Altai over the past 16185 cal. yr BP on the example of sediments of the Mokhovoe mire (Altai krai). 27 local fire episodes were identified based on macro-charcoal analysis and statistical processing in the CharAnalysis software package in R space. According these data, 7 periods of maximum pyrogenic activity were identified over the entire period of the Mokhovoe mire existed. The obtained data were compared with published paleoecological reconstructions for the Mokhovoe mire. To identify relationship between vegetation and fires, we carried out a correlation analysis between macro-charcoal and pollen data using the Pearson method in the PAST program. As a result, the possible influence of fires on the change of vegetation cover (post-fire successions) was revealed. The study also recorded high pyrogenic activity during warm and humid climatic periods when fir (*Abies sibirica*) dominated in the vegetation cover.

Keywords: Northern Altai, palaeo-fires, Holocene, charcoal analysis, swamp sediments

For citation: Pupysheva M.A., Blyakharchuk T.A. The influence of palaeo-fire activity on the dynamics of vegetation cover in the piedmont of Northern Altai for the past 16000 years // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 588-593. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-588

1. Introduction

In the beginning of the 21st century, the global spread and occurrence of wildfires increased rapidly (Wang et al., 2021). This trend is also typical for the Altai-Sayan region of Russia. According to the forecasts, fire danger days and fire intensity are expected to increase due to climate change in Russia by the end of this century (Sherstyukov and Sherstyukov, 2014). To prevent possible devastating consequences for the environment, society and economy, as well as to draw up reliable forecasts of forest fire rates in the studied region, data on the long-term dynamics of fires and their impact on the surrounding landscape is needed. Modern palaeoecological methods of reconstruction based on the analysis of reliable natural “archives” - lake or swamp sediments can help us (Marlon, 2020). These sediments store information in the form of plant organics, palynomorphs, as well as micro- (size <125 microns) and macroscopic charcoal particles (size >125 microns) – direct indicators of palaeo-fires (Mooney and Tinner, 2011).

2. Materials and methods

As a primary object of the study, we chose one of the sites in the piedmont of Northern Altai – Mokhovoe mire. The swamp located 4 km southeast of the village Aya (Altai krai). The modern Mokhovoe mire is in a mesotrophic stage with a dominance of birch-pine swamp facies characterized by abundant swamp-shrub understorey and sphagnum moss ground cover. The landscapes surrounding the swamps are mainly represented by pine and birch forest.

During the summer expeditions in 2017, we took core of peat sediments 6.4 m. thick from the deepest part of Mokhovoe mire for multi-proxy palaeoecological research. In common, 130 samples were taken along the entire length of the core for further processing in the laboratory. Radiocarbon dating of 5 samples was carried out at the National Taiwan University by AMS method (Pupysheva and Blyakharchuk, 2023). Based on radiocarbon dates calibrated in the Bacon program (Blaauw and Christen, 2011) in R version 4.0.4 (R Core Team, 2020) in system “from the present time” (1950

*Corresponding author.

E-mail address: 455207@mail.ru (M.A. Pupysheva)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



was set as the reference point), a depth-age model of the sediments of the Mokhovoe mire was made and the age of the remaining samples of the peat column was calculated.

To reconstruct the local history of palaeo-fires, we used the method of macro-charcoal analysis of peat sediments (Mooney and Tinner, 2011). The main stages of physical and chemical processing of samples are presented in the work (Mooney and Tinner, 2011).

The obtained palaeo-fire data were compared with previously published micro-charcoal, spore-pollen and other results for the Mokhovoe mire (Blyakharchuk, 2022; Blyakharchuk et al., 2023).

Statistical processing of the results was performed using a CharAnalysis program (Higuera, 2009) in R space (R Core Team, 2020) based on radiocarbon and macro-charcoal data. The CharAnalysis identified specific fire events, their intensity, frequency, and the rate of accumulation of charcoal particles. The data of the depth-age model of the deposits of the Mokhovoe mire were used as a chronological basis.

To identify possible connections between fire activity and vegetation cover, a correlation analysis was carried out using the Pearson method in the PAST program (Hammer et al., 2001) based on a comparison of micro- and macro-particles of charcoal with the pollen content of the predominant plant taxa for the Mokhovoe mire. The noted correlations are significant at $P < 0.05$ boxed.

3. Results and discussion

According to the data obtained, sedimentation in the Mokhovoe mire began at 16185 cal yr BP. During this time, 27 local palaeo-fires occurred with 7 periods of maximum pyrogenic activity: 14200–13600, 11500–10500, 9800–9200, 8400–6300, 5500–4300, 2900–1900, 1600–1000 cal yr BP (Blyakharchuk et al., 2023; Pupyshva and Blyakharchuk, 2023).

The most palaeo-fires occurred in the Atlantic period of the Holocene – 9 fire episodes with a maximum of fires at the AT/SB boundary – 5500-5000 cal. yr BP. The lowest pyrogenic intensity was recorded in the Middle Dryas, Allerød, Younger Dryas and at the end of the Subatlantic period. As palaeo-fires occurred, there was a change in plant communities and stages of mire evolution (Blyakharchuk, 2022; Pupyshva and Blyakharchuk, 2023). In the Middle Dryas forest-tundra landscapes were widespread and local fires were not detected. At that time neither lake nor swamp existed, and the bottom sediments were represented by clays. Climate warming at the beginning of the Allerød was marked by a change in landscapes from forest-tundra to steppe. At the same time a lake formed where Mokhovoe mire is today. The CharAnalysis program identified 3 local paleo-fires with low pyrogenic intensity. From the Preboreal to the end of the Boreal period, birch forest-steppe dominated in the vegetation cover. 10000 cal. yr BP the lake turned into eutrophic mire. Fire activity has increased at this time - 7 local paleofire episodes were noted with maximum pyrogenic activity at the end of the Preboreal. From the Atlantic period to

the present time, the birch forest-steppe turned into a mixed pine-birch forests. During this period, 17 local fires occurred with peak pyrogenic activity at the end of the Atlantic - in the beginning of the Subboreal. From 1000 cal. yr BP the intensity of fires began to decrease and reached the minimum value to the present day.

The correlation analysis showed that micro-charcoal particles positively correlated with macro-charcoal particles ($c = 0.20$), fir (*Abies sibirica*) ($c = 0.20$) and wormwood (*Artemisia*) ($c = 0.22$), and negatively with birch (*Betula pendula*) ($c = -0.28$). Macro-charcoals are positively correlated only with fir pollen ($c = 0.19$). It follows from this, the results of counting micro- and macro-charcoal particles as indicators of fire events are generally comparable with each other, confirming that accumulation of micro-charcoal and macro-charcoal took place synchronously in closed basin of Mokhovoe mire. A positive correlation of micro- and macro-charcoals with fir pollen (*Abies sibirica*) indicates high pyrogenic activity during warm and humid climatic periods, possibly due to the intensification of cyclones and increased thunderstorm activity. In addition, micro-charcoals showed a negative correlation with birch pollen (*Betula pendula*), probably due to destructive influence of fires on mire vegetation, causing the proportion of birch in the vegetation cover decreased. Later after the fires the birch storey was restored again on the mire. The sharp growth of birch just began 1000 cal. yr BP during a decrease in pyrogenic activity in the Mokhovoe mire.

4. Conclusions

From the Late Glacial to the present, the piedmont of Northern Altai has been repeatedly exposed to fires. The presented data of the Mokhovoe mire during the past 16185 cal. yr BP show a direct relationship between palaeo-fire activity and the subsequent dynamics of vegetation. A positive correlation between micro- and macro-charcoals with *Abies sibirica* was noted. Its share in sediments increased parallel to increase in pyrogenic activity. Micro-charcoals were negatively correlated with *Betula pendula*, reflecting the role of this species in post-fire succession on the mire.

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the state budget theme of the IMCES SB RAS № FWRG-2021-0003.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6: 457–474.
- Blyakharchuk T. A., Pupyshva M. A., Blyakharchuk P. A. 2023. Late Glacial and Holocene history of vegetation,

climate and fires in Altai Mountain piedmonts according to multi proxy palaeoecological investigation of Mokhovoe mire. Transactions of the Karelian Research Centre RAS 8: 85–89. DOI: [10.17076/eco1837](https://doi.org/10.17076/eco1837) (In Russian)

Blyakharchuk T.A. 2022. Dynamics of the vegetation cover in western foothills of the Altai mts. during Late Glacial and Holocene according to data of spore-pollen analysis of the peat deposits of “Mokhovoe” bog. Actual problems of the modern palynology: Proceedings of XV All-Russian Palynological Conference. P. 53–56. (In Russian)

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. Past - palaeontological statistics. <http://www.uv.es/~pardomv/pe/2001>

Higuera P. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University: 27.

Marlon J. R. 2020. What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research* 96: 66-87.

Mooney S., Tinner W. 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires Peat* 7: 1–18.

Pupysheva M. A., Blyakharchuk T.A. 2023. Fire activity and landscape dynamics in the piedmont of the Northern Altai from the Late Glacial to the present. XV Siberian meeting and school of young scientists on climate and environmental monitoring. Tomsk. P. 177-180. (In Russian).

R Core Team. 2020. R: a language and environment for statistical computing; R foundation for statistical computing. Vienna. (available at: www.r-project.org/index.html)

Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B. 2014. Estimates of trends in the intensification of forest fires in Russia until the end of the 21st century according to scenario experiments of the fifth generation climate models. *Meteorology and Hydrol. Papers* 5: 17-30. (In Russian).

Wang Z., Huang J.G., Ryzhkova N. et al. 2021. 352 years long fire history of a Siberian boreal forest and its primary driving factor. *Global and Planetary Change*. V. 207. pp. 103653.

Влияние палеопожарной активности на динамику растительного покрова в предгорьях Северного Алтая за последние 16000 лет

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПупышева М.А.^{1*}, Бляхарчук Т.А.^{1,2}¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, пр. Академический, 10/3, Томск, 634055, Россия²Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты реконструкции динамики палеопожаров в предгорьях Северного Алтая за последние 16185 кал. л. на примере отложений болота Моховое (Алтайский край). На основе макроуголькового анализа и статистической обработки данных в программном пакете CharAnalysis в пространстве R выявлено 27 локальных пожарных эпизодов. Согласно результатам, за весь период существования болота отмечено 7 периодов максимальной пирогенной активности. Полученные данные были сопоставлены с опубликованными палеоэкологическими реконструкциями для исследуемого болота. Для подтверждения выявленных взаимосвязей между пожарной активностью и растительным покровом проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST. В результате выявлено возможное влияние пожаров на изменение растительного покрова (последпожарные сукцессии). В ходе исследования также зафиксирована высокая пирогенная активность в теплые и влажные климатические периоды, когда в растительном покрове доминировала пихта сибирская (*Abies sibirica*).

Ключевые слова: Северный Алтай, палеопожары, голоцен, угольковый анализ, болотные отложения

Для цитирования: Пупышева М.А., Бляхарчук Т.А. Влияние палеопожарной активности на динамику растительного покрова в предгорьях Северного Алтая за последние 16000 лет // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 588-593. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-588

1. Введение

В начале XXI века резко увеличилось распространение и возникновение лесных пожаров по всему миру (Wang et al., 2021). Эта тенденция характерна и для Алтае-Саянского региона России. По прогнозам, из-за изменения климата в России к концу текущего столетия ожидается увеличение пожароопасных дней и интенсивности пожаров (Sherstyukov and Sherstyukov, 2014). Для предотвращения возможных разрушительных последствий для окружающей среды, общества и экономики, а также для составления достоверных прогнозов интенсивности лесных пожаров в изучаемом регионе необходимы данные о многолетней динамике пожаров и их влиянии на окружающий ландшафт. В этом нам могут помочь современные палеоэкологические методы реконструкции, основанные на анализе надежных природных «архивов» - озерных или болотных отложений (Marlon, 2020). Эти отложения хранят информацию в виде растительной органики, палиноморф, а также микро- (размером < 125 мкр) и макроscopicических частиц древесного угля (разме-

ром > 125 мкр) – прямых индикаторов палеопожаров (Mooney and Tinner, 2011).

2. Материалы и методы

В качестве объекта исследования мы выбрали один из участков в предгорьях Северного Алтая – болото Моховое. Болото расположено в 4 км юго-восточнее села Ая (Алтайский край). Современное болото Моховое находится в мезотрофной стадии развития с доминированием берёзово-сосновой болотной фации и довольно обильным болотно-кустарничковым ярусом. Окружающие болота ландшафты в основном представлены сосново-березовым лесом.

Во время летней экспедиции 2017 года, был отобран керн торфяных отложений мощностью 6,4 м для комплексных палеоэкологических исследований. Всего по всей длине керна было отобрано 130 проб для дальнейшей обработки в лаборатории. Радиоуглеродное датирование 5 образцов проведено в Национальном университете Тайваня

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: 455207@mail.ru (М.А. Пупышева)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



методом AMS (Pupysheva and Blyakharchuk, 2023). На основе радиоуглеродных дат, откалиброванных в программе Bacon (Blaauw and Christen, 2011) в R 4.0.4 (R Core Team, 2020) в системе счисления «от настоящего времени» (за нулевую точку отсчета принят 1950 г.) рассчитан календарный возраст каждого образца.

Для реконструкции локальной истории палеопожаров мы использовали метод макроуголькового анализа торфяных отложений. Основные этапы физической и химической обработки образцов представлены в работе (Mooney and Tinner, 2011). Полученные данные по динамике палеопожаров были сопоставлены с ранее опубликованными результатами микроуголькового, спорово-пыльцевого и других анализов для исследуемого болота (Blyakharchuk, 2022; Blyakharchuk et al., 2023). Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы CharAnalysis (Higuera, 2009) в пространстве R (R Core Team, 2020) на основе радиоуглеродных и макроугольковых данных. С помощью CharAnalysis определены конкретные пожарные эпизоды, их интенсивность, частота и скорость аккумуляции частиц угольков. В качестве хронологической основы использовались данные глубинно-возрастной модели отложений болота Моховое. Для подтверждения выявленных взаимосвязей между пожарной активностью и растительным покровом проведен корреляционный анализ методом Пирсона в программе PAST (Hammer et al., 2001) на основе сравнения микро- и макрочастиц угля с содержанием пыльцы преобладающих растительных таксонов для болота Моховое. Отмеченные корреляции значимы при $P < 0,05$ boxed.

3. Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным, осадконакопление болота Моховое началась 16185 кал. л. назад. За это время произошло 27 локальных палеопожаров с 7 периодами максимальной пирогенной активности: 14200–13600, 11500–10500, 9800–9200, 8400–6300, 5500–4300, 2900–1900, 1600–1000 кал. л. н. (Blyakharchuk et al., 2023; Pupysheva and Blyakharchuk, 2023).

Наибольшее количество палеопожаров произошло в атлантический период голоцена – 9 пожарных эпизодов с максимумом пожаров на границе атлантического и суббореального периодов – 5500–5000 кал. л. н. Наименьшая пирогенная интенсивность отмечена в среднем дриасе, аллереде, позднем дриасе и в конце субатлантического периода. По мере возникновения пожаров происходила смена растительных сообществ и стадий развития болот (Blyakharchuk, 2022; Pupysheva and Blyakharchuk, 2023). В среднем дриасе были широко распространены лесотундровые ландшафты при полном отсутствии локальных пожаров. В это время ни озера, ни болота не существовало, а донные отложения были представлены глинами. Потепление климата в начале аллереда ознаменовалось сменой ландшафтов от лесотундры к степям. Тогда же на

месте современного болота образовалось озеро. В этот период программой CharAnalysis выявлено 3 локальных палеопожара с довольно низкой пирогенной интенсивностью. С пребореала и до конца бореала в растительном покрове доминировала березовая лесостепь. 10000 кал. л. назад озеро превратилось в эвтрофное болото. В это время возросла пожарная активность – отмечено 7 локальных пожаров с максимальной пирогенной активностью в конце пребореала. С атлантического периода и до настоящего времени на смену березовой лесостепи пришли смешанные сосново-березовые леса. За этот период произошло 17 локальных пожаров с пиком пирогенной активности в конце атлантического – начале суббореального периода. 1000 кал. л. н. интенсивность пожаров стала снижаться и достигла минимального значения к настоящему времени.

Проведенный корреляционный анализ показал, что частицы микроугольков положительно коррелируют с макроуголками ($c=0,20$), пихтой ($c=0,20$) и польнью ($c=0,22$), а отрицательно с березой ($c=-0,28$). Макроуголки положительно коррелируют только с пылью пихты ($c=0,19$). Из этого следует, что результаты подсчета частиц микро- и макроугольков как индикаторов пожарных событий в целом сопоставимы друг с другом, подтверждая наличие возгораний в пределах болота Моховое. Положительная корреляция микро- и макроугольков с пылью пихты (*Abies sibirica*) свидетельствует о высокой пирогенной активности во время теплых и влажных климатических периодов, возможно за счет интенсификации циклонов и усиления грозовой активности. Кроме того, микроуголки показали отрицательную корреляцию с пылью березы (*Betula pendula*), вероятно, из-за сильных возгораний в пределах болота доля березы в растительном покрове снижалась, а после пожаров восстанавливалась вновь. Резкий рост березы как раз начался 1000 кал. л. н. во время снижения пирогенной активности на болоте Моховое.

4. Заключение

С позднеледниковья и до настоящего времени предгорья Северного Алтая неоднократно подвергались пожарам. Представленные данные по болоту Моховое за последние 16185 кал. л. показывают прямую связь между пожарной активностью и последующей динамикой растительности. Отмечена положительная корреляция микро- и макроугольков с пихтой (*Abies sibirica*). Ее доля в осадках увеличивалась параллельно с увеличением пирогенной активности. Микроуголки отрицательно коррелировали с березой (*Betula pendula*), что отражает роль этого вида в послепожарной сукцессии на болоте Моховое.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке государственной бюджетной темы ИМКЭС СО РАН № FWRG-2021-0003.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an 601 autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6: 457–474.

Blyakharchuk T. A., Pupysheva M. A., Blyakharchuk P. A. 2023. Late Glacial and Holocene history of vegetation, climate and fires in Altai Mountain piedmonts according to multi proxy palaeoecological investigation of Mokhovoe mire. *Transactions of the Karelian Research Centre RAS* 8: 85–89. DOI: [10.17076/eco1837](https://doi.org/10.17076/eco1837) (In Russian)

Blyakharchuk T.A. 2022. Dynamics of the vegetation cover in western foothills of the Altai mts. during Late Glacial and Holocene according to data of spore-pollen analysis of the peat deposits of “Mokhovoe” bog. *Actual problems of the modern palynology: Proceedings of XV All-Russian Palynological Conference*. P. 53–56. (In Russian)

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. Past - palaeontological statistics. <http://www.uv.es/~pardomv/pe/2001>

Higuera P. 2009. *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis*. Bozeman: MT, Montana State University: 27.

Marlon J. R. 2020. What the past can say about the present and future of fire. *Quaternary Research* 96: 66-87.

Mooney S., Tinner W. 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires Peat* 7: 1–18.

Pupysheva M. A., Blyakharchuk T.A. 2023. Fire activity and landscape dynamics in the piedmont of the Northern Altai from the Late Glacial to the present. *XV Siberian meeting and school of young scientists on climate and environmental monitoring*. Tomsk. P. 177-180. (In Russian).

R Core Team. 2020. R: a language and environment for statistical computing; R foundation for statistical computing. Vienna. (available at: www.r-project.org/index.html)

Sherstyukov B. G., Sherstyukov A. B. 2014. Estimates of trends in the intensification of forest fires in Russia until the end of the 21st century according to scenario experiments of the fifth generation climate models. *Meteorology and Hydrol. Papers* 5: 17-30. (In Russian).

Wang Z., Huang J.G., Ryzhkova N. et al. 2021. 352 years long fire history of a Siberian boreal forest and its primary driving factor. *Global and Planetary Change*. V. 207. pp. 103653.

Sediments and morphology of deep lakes of Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk krai, Evenkia): on the problem of the Tunguska Event at 1908



Rogozin D.Y.^{1,2,*}, Darin A.V.³, Kalugin A.I.³, Krylov P.S.⁴, Meydus A.V.⁵

¹Institute of Biophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences (IBP SB RAS), Akademgorodok Str., 50/50, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University (SibFU), 79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660041, Russia

³Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Division of Russian Academy of Sciences, Prospekt Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Novosibirsk, Russia

⁴Kazan (Volga) Federal University, Kremlevskaya18/1, Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russia

⁵Astafiev Krasnoyarsk State Pedagogical University, Ady Lebedevoi 89, 660049, Krasnoyarsk, Russia

ABSTRACT. The shape of the bottom and the thickness of sediments of small lakes Zapovednoye and Peyungda, located 50-60 km from the supposed epicenter of the “Tunguska Event” of 1908, were studied using echo-sounding and seisimo-acoustic profiling, and their age was estimated using ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ¹⁴C. It was revealed that both lakes have funnel shape with a depth of 60 and 34 m, respectively, and are similar in shape and size to Lake Cheko, which, according to some researchers, is an impact crater formed by a celestial body as a result of the “Tunguska Event 1908”. The examples of lakes Zapovednoye and Peyungda show that the shape of Lake Cheko is not unique to this area. The age of the bottom sediments of lakes Zapovednoye and Peyungda exceeds several thousand years. In the sediments of lakes Zapovednoye and Peyungda, a layer with a high content of terrigenous elements was identified, presumably formed due to the input of disturbed soil layer as a result of the massive fall of trees after the “Tunguska 1908”. Thus, the presence of two deep funnel-shaped lakes near the epicenter of the “Tunguska 1908” much older than 1908, casts doubt on the uniqueness of Lake Cheko, and therefore its impact origin. In addition, according to our estimate, the age of Lake Cheko is no less than 300 years, which contradicts the hypothesis of its origin as a result of the “Tunguska 1908”.

Keywords: Tunguska 1908, lake sediments, bathymetry, seisimo-acoustics

For citation: Rogozin D.Y., Darin A.V., Kalugin A.I., Krylov P.S., Meydus A.V. Sediments and morphology of deep lakes of Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk krai, Evenkia): on the problem of the Tunguska Event at 1908 // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 594-599. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-594](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-594)

1. Introduction

The Tunguska Event 1908 (TE), the so-called “Tunguska meteorite”, is the most powerful atmospheric explosion in history that occurred on June 30, 1908 in the area of the village of Vanavara (Evenkia, Krasnoyarsk Territory, Russia). TE resulted in a strong forest fire and a massive fall of trees over a large area. The causes of the TE have not yet been precisely established; according to one of the latest hypotheses, it was the passage of a cosmic body through the atmosphere near the Earth’s surface (Khrennikov et al., 2020). According to a number of researchers Lake Cheko, a small round shaped 50-m deep lake located near the epicenter of the TC, is presumably a crater from the fall

of a fragment of a celestial body at the moment of TC (Gasperini et al., 2007). As part of paleoclimatic studies of Central Siberia, we for the first time assessed the age and studied the morphological characteristics of lakes Peyungda and Zapovednoye, located in the same area.

2. Materials and methods

Lake Zapovednoye (60°31.688’ N, 101°43.740’ E), a small body of almost circular shape with a diameter of about 500 m, located on the border of the Tungusky State Nature Reserve (Evenkia district of the Krasnoyarsk Territory), 60 km from the village of Vanavara, and approximately 60 km south of Lake Cheko and the supposed epicenter of the TE. Lake

*Corresponding author.

E-mail address: rogozin@ibp.ru (D.Y. Rogozin)

Received: June 01, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



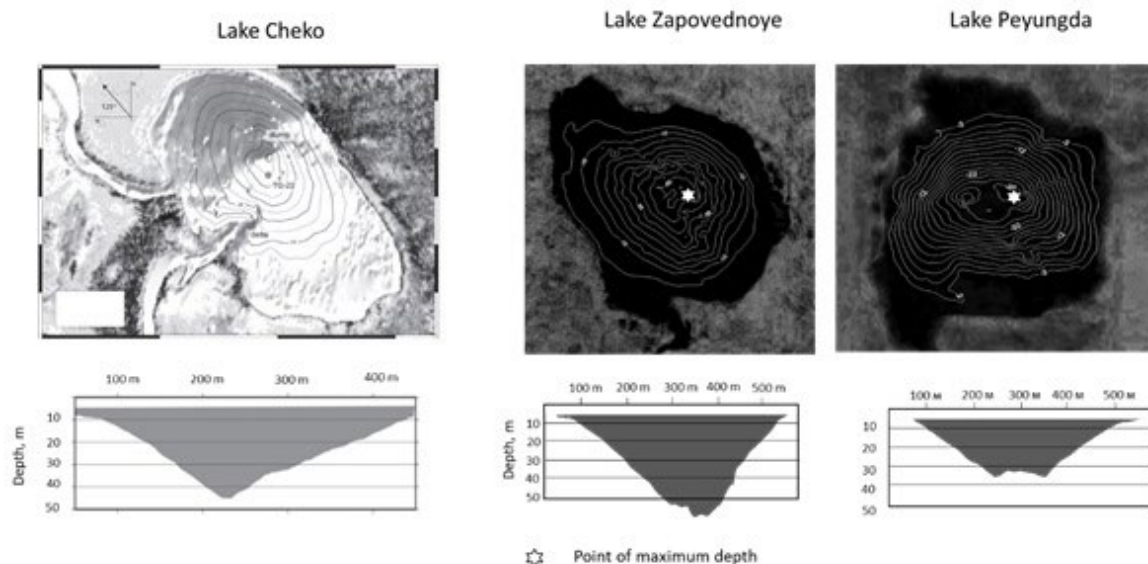


Fig.1. Morphological characteristics of lakes Cheko (from Gasperini et al., 2007), Zapovednoye and Peyungda (from Rogozin et al., 2023).

Peyungda (60°37.174'N 101°38.442'E) also has an almost regular round shape with a diameter of about 600 m, and is located 12 km northwest from the Lake Zapovednoye. The small river Verkhnyaya Lakura, a tributary of the Podkamennaya Tunguska River, flows through both lakes (Fig. 1). Bottom sediments up to 140 cm deep were collected using a gravity sampler in the central part of the lakes. The age of sediments from lakes Zapovednoye and Peyungda was estimated based on the distribution of radioactivity of the isotopes ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{14}C . The bathymetry maps of the lakes were surveyed using an echo sounder-chartplotter data. The continuous seismoacoustic profiles of sediments were obtained by a seismoacoustic complex created at the Kazan (Volga Region) Federal University. The elemental composition of bottom sediments was determined by X-ray fluorescence scanning (XRF-SI, Novosibirsk).

3. Results

It was found that the maximum depth of lakes Zapovednoye and Peyungda is 60 m and 35 m, respectively. The bottom of Lake Zapovednoye has the shape of a conical funnel (Fig. 1). Lake Peyungda also has a conical shape with two depressions in the central part, the thickness of the bottom sediments of the lakes Zapovednoye and Peyungda in the point of maximum depth reaches 4 m and 6 m, respectively (Rogozin et al., 2023). Age of the 120 cm-long core of Lake Zapovednoye is over 2 thousand years; the 140 cm-long core of Lake Peyungda is over 4 thousand years. Clearly visible layers with increased content of terrigenous elements - Ti, Rb, Y, Zr were identified in the sediments of both lakes at the sediment depths corresponding to approximately 1908 (Darin et al., 2020).

4. Discussion

The shape of the bottom of lakes Zapovednoye and Peyungda indicates that the shape of Lake Cheko is

not unique (Rogozin et al., 2023). The similarity of the shape of the three reservoirs rather indicates their common origin. The difference in the age of the lake sediments testifies against the hypothesis about the impact origin of these lakes - the fall of three almost identical cosmic bodies at different times in almost the same place on Earth is unlikely. In addition, the location of all three lakes in river beds (Lake Cheko - in the bed of the Kimchu River) can hardly be a random phenomenon. Consequently, the geological nature of the origin of all three lakes seems more likely. Determining the origin of these lakes is the subject of further research. We suppose that a clearly distinguishable layer with an increased content of terrigenous elements appeared as a result of the washout of the soil cover, disturbed by the massive fall of trees at the time of the TE (Darin et al., 2020). A previously published study found that the 126 cm-long core of Lake Cheko was about 300-400 years old (Rogozin et al., 2017).

5. Conclusions

Thus, we have obtained facts that testify rather against the hypothesis about the impact emergence of Lake Cheko as a result of the TE. To definitively clarify the question of the origin of Lake Cheko, detailed studies of longer cores are required.

Acknowledgements

The research was funded by Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00185 <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

References

- Darin A.V., Rogozin D.Y., Meydus A.V. et al. 2020. Traces of “Tunguska 1908” event in sediments of Lake Zapovednoye according to SR-XRF data. *Doklady Earth Sciences* 492 (2): 442-445. DOI: [10.1134/S1028334X20060045](https://doi.org/10.1134/S1028334X20060045)
- Gasperini L., Alvisi F., Biasini G. et al. 2007. A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova*. 19: 245–251.
- Khrennikov D.E., Titov A.K., Ershov A.E. et al. 2020. On the possibility of through passage of asteroid bodies across the Earth’s atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493 (1): 1344–1351.
- Rogozin D.Y., Darin A.V., Kalugin I.A. et al. 2017. Sedimentation rate in Lake Cheko (Evenkia, Siberia): new evidence to the problem of 1908 Tunguska Event. *Doklady Earth Sciences* 476 (2): 1226-1228.
- Rogozin D.Y., Krylov P.S., Dautov A.N. et al. 2023. Morphology of lakes of the Central Tunguska Plateau (Krasnoyarsk krai, Evenkia): new data on the problem of the Tunguska Event of 1908. *Doklady Earth Sciences* 510: 307-311. DOI: [10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)

Донные отложения и морфология глубоких озер Центрально-Тунгусского плато – к вопросу о Тунгусской катастрофе 1908 года

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYРогозин Д.Ю.^{1,2,*}, Дарьин А.В.³, Калугин И.А.³, Крылов П.С.⁴, Мейдус А.В.⁵¹ Институт биофизики Сибирского Отделения Российской Академии наук, ул. Академгородок 50 стр. 50, Красноярск, 660036, Россия² Сибирский Федеральный Университет, пр-т Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия³ Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, ул. Кремлевская, д.18, корп.1, г. Казань, 420008, Республика Татарстан, Россия⁴ Институт геологии и минералогии им. Соболева Сибирского Отделения Российской Академии наук, пр-т Коптюга 3, Новосибирск, 630090, Россия⁵ Красноярский Государственный Педагогический Университет им. Астафьева, ул. Ады Лебедевой, 89, Красноярск, 660049, Россия

АННОТАЦИЯ. С помощью эхолокации и сейсмоакустического профилирования исследована форма дна и толщина донных отложений небольших озер Заповедное и Пеюнга, расположенных в 50-60 км от предполагаемого эпицентра «Тунгусской катастрофы» 1908 года, а также оценен их возраст с помощью ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{14}C . Выявлено, что оба озера имеют формы конических воронок глубиной 60 и 34 м, соответственно, и схожи по форме и размерам с озером Чеко, которое по предположениям некоторых исследователей является следом от падения небесного тела в результате «Тунгусской катастрофы» 1908 года. На примере озер Заповедное и Пеюнга мы показали, что форма озера Чеко не уникальна для данной местности. Возраст донных отложений озер Заповедное и Пеюнга превышает несколько тысяч лет. В отложениях озер Заповедное и Пеюнга выявлен слой с повышенным содержанием терригенных элементов, предположительно сформировавшийся из-за смыва нарушенного слоя почвы в результате массового вывала деревьев после «Тунгусской катастрофы» 1908 года. Таким образом, наличие вблизи эпицентра ТК еще двух глубоких округлых озер значительно старше 1908 года, ставит под сомнение уникальность озера Чеко, а следовательно – и его импактное происхождение. Кроме того, по нашей оценке, возраст озера Чеко не меньше 300 лет, что противоречит гипотезе о его происхождении в результате «Тунгусской катастрофы».

Ключевые слова: Тунгусский феномен 1908 г., донные отложения, батиметрия, сейсмоакустика

Для цитирования: Рогозин Д.Ю., Дарьин А.В., Калугин И.А., Крылов П.С., Мейдус А.В. Донные отложения и морфология глубоких озер Центрально-Тунгусского плато – к вопросу о Тунгусской катастрофе 1908 года // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 594-599. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-594](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-594)

1. Введение

Тунгусская катастрофа (ТК), так называемый «Тунгусский метеорит» – мощный в истории атмосферный взрыв, произошедший 30 июня 1908 года в районе п. Ванавара (Эвенкия, Красноярский край, Россия), вызвавший сильный лесной пожар и массовый вывал деревьев на значительной территории. Причины ТК до сих пор точно не установлены, по одной из последних гипотез это было прохождение космического тела через атмосферу вблизи поверхности Земли (Khrennikov et al., 2020). Вблизи

эпицентра ТК расположено озеро Чеко, имеющее округлую форму и значительную глубину свыше 50 м. Ряд исследователей на основании морфологических характеристик и оценки возраста отложений высказали гипотезу, что оз. Чеко является кратером от падения осколка небесного тела в момент ТК (Gasperini et al., 2007). Нами в рамках палеоклиматических исследований Средней Сибири впервые была проведена оценка возраста и исследованы морфологические характеристики озер Пеюнга и Заповедное, расположенных в этом же районе.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: rogozin@ibp.ru (Д.Ю. Рогозин)

Поступила: 01 июня 2024; **Принята:** 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Озеро Заповедное (60°31.688' СШ, 101°43.740' ВД), небольшой водоем почти круглой формы диаметром около 500 м, расположенный на границе Государственного природного заповедника «Тунгусский» (Эвенкийский район Красноярского края), в 60 км от поселка Ванавара, и приблизительно в 60 км к югу от озера Чеко и предполагаемого эпицентра взрыва 1908 г. Озеро Пеюнга (60°37.174' СШ 101°38.442' ВД) также имеет почти правильную округлую форму диаметром около 600 м, и расположено в 12 км к северо-западу от оз. Заповедное. Через оба озера протекает небольшая река Верхняя Лакура, приток реки Подкаменная Тунгуска (Рис.1). Донные отложения глубиной до 140 см отбирались гравитационным пробоотборником в центральной части озер. Возраст отложений озер Заповедное и Пеюнга оценивался на основе распределения радиоактивности изотопов ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{14}C . Форма дна озер Заповедное и Пеюнга выявлена с помощью эхолота-картплоттера. Сейсмоакустические исследования донных отложений проводились по методу непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСП) с использованием сейсмоакустического комплекса, созданного в Казанском (Приволжском) Федеральном Университете. Элементный состав донных отложений определяли рентгено-флуоресцентным сканированием (РФА-СИ, Новосибирск).

3. Результаты

Было выяснено, что максимальная глубина озер Заповедное и Пеюнга равна 60 м, и 35 м, соответственно. Дно озера Заповедное имеет форму конической воронки (Рис.1). Озеро Пеюнга имеет также коническую форму с двумя углублениями в центральной части, мощность донных отложений оз. Заповедное и Пеюнга в районе максимальной глубины достигает 4 м и 6 м, соответственно (Рогозин и др., 2023). Возраст керна оз. Заповедное длиной

120 см превышает 2 тысячи лет, керн озера Пеюнга длиной 140 см имеет возраст свыше 4 тысяч лет. В отложениях обоих озер выявлен хорошо заметный прослой, соответствующий примерно 1908 году, с повышенным содержанием терригенных элементов – Ti, Rb, Y, Zr (Дарьин и др., 2020)

4. Обсуждение

Форма дна озер Заповедное и Пеюнга опровергает уникальность формы озера Чеко (Рогозин и др., 2023). Схожесть формы трех водоемов скорее указывает на общность их происхождения. Разница в возрасте толщи озерных отложений свидетельствует против гипотезы об импактном происхождении этих озер – падение трех почти одинаковых космических тел в разное время практически в одном месте Земли крайне маловероятно. Вдобавок, расположение всех трех озер в руслах рек (оз. Чеко – в русле реки Кимчу) вряд ли может быть случайным явлением. Следовательно, более вероятной представляется геологическая природа происхождения всех вышеописанных озер. Выяснение происхождения этих водоемов является предметом дальнейших исследований. Мы полагаем, что четко визуально различимый слой с повышенным содержанием ряда элементов появился в результате смыва почвенного покрова, нарушенного массовым вывалом деревьев с корнями в момент Тунгусской катастрофы 1908 года (Дарьин и др., 2020). Проведенная нами ранее датировка отложений озера Чеко показала, что возраст нижней части керна длиной 126 см составляет около 300-400 лет (Рогозин и др., 2017).

5. Заключение

Таким образом, нами получен ряд фактов, свидетельствующих против гипотезы о возникновении озера Чеко в результате Тунгусского феномена. Для окончательного выяснения вопроса о происхождении озера Чеко требуются детальные исследования более длинных кернов.

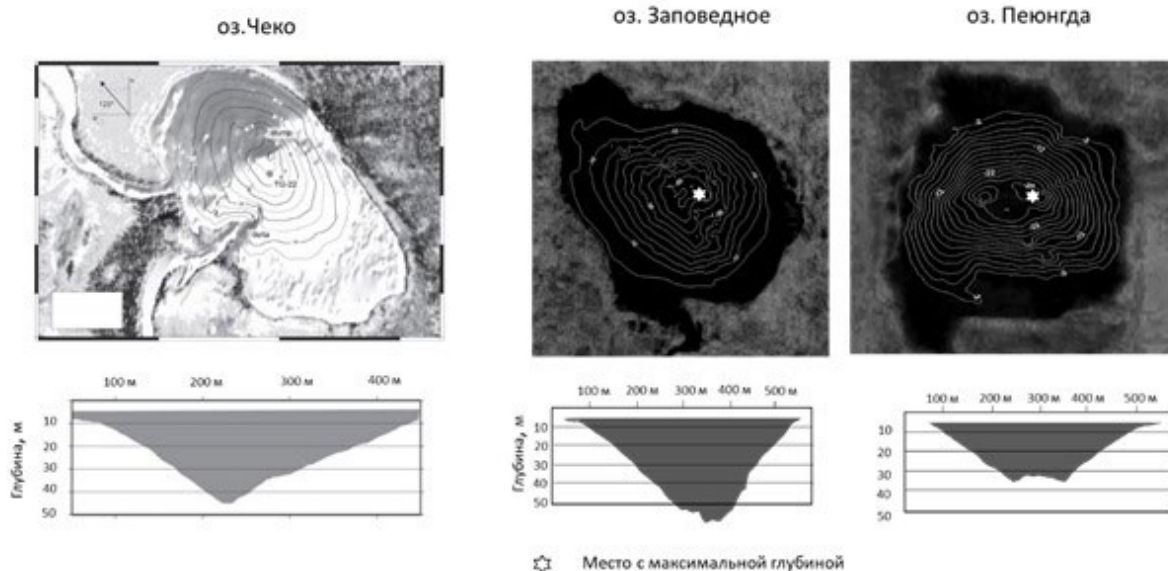


Рис.1. Морфологические характеристики озер Чеко (из Gasperini et al., 2007), Заповедное и Пеюнга (из Рогозин и др., 2023).

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда, грант № 22-17-00185, <https://rscf.ru/project/22-17-00185/>.

Конфликт интересов

Авторы не имеют конфликта интересов

Список литературы

Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В. и др. 2020. Следы Тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера Заповедное по данным сканирующего РФА СИ. Доклады РАН. Науки о Земле 492 (2): 61-65. DOI: [10.1134/S1028334X20060045](https://doi.org/10.1134/S1028334X20060045)

Рогозин Д.Ю., Дарьин А.В., Калугин И.А. и др. 2017. Оценка скорости накопления донных отложений в озере Чеко (Эвенкия, Сибирь): новые сведения по проблеме Тунгусского феномена 1908 года. Докл. АН. Науки о Земле 476 (6): 685-687.

Рогозин Д.Ю., Крылов П.С., Даутов А.Н. и др. 2023. Морфология озер Центрально-Тунгусского плато (Красноярский край, Эвенкия): новые сведения по проблеме Тунгусской катастрофы 1908 года. Доклады РАН. Науки о Земле 510 (1): 81-85. DOI: [10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)

Gasperini L., Alvisi F., Biasini G. et al. 2007. A possible impact crater for the 1908 Tunguska Event. *Terra Nova* 19: 245–251.

Khrennikov D.E., Titov A.K., Ershov A.E. et al. 2020. On the possibility of through passage of asteroid bodies across the Earth's atmosphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 493 (1): 1344–1351.

Coastal lakes of Southern Far East: climatic impact and natural hazards records



Razjigaeva N.G.* , Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Makarova T.R.

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Radio St. 7, Vladivostok, 690041, Russia

ABSTRACT. The study of sediments of coastal lakes and palaeo-lakes in the southern Far East allowed us to identify several short-term paleoclimatic events in the transition “continent-ocean” zone. In the southern Kurils, palaeo-lakes that existed since the Late Glacial were found. Most of the lagoonal lakes were formed when sea level stabilized or declined slightly during the Holocene transgression. The most detailed data on hydroclimatic changes were obtained for the Middle-Late Holocene. The intensity of the summer monsoon and cyclogenesis activity associated with ocean and atmospheric anomalies in the Asia-Pacific region played a major role in the lake evolution. Sea water input to reservoirs occurred during extreme storms and tsunamis.

Keywords: lake evolution, hydroclimatic changes, volcanic ash falls, tsunami, extreme storms, Holocene

For citation: Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A., Mokhova L.M., Makarova T.R. Coastal lakes of Southern Far East: climatic impact and natural hazards records // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. - № 4. - P. 600-605. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-600

1. Introduction

Coastal lakes are widespread on the coast of the southern Far East. Their evolution is related to climatic changes, and sediments are among the most informative natural archives for environment reconstructions. The development of lakes on the marine coast is closely related to sea level fluctuations and lithodynamic processes in the coastal zone, as well as the manifestation of dangerous hydrological events: extreme storms and tsunamis. The identification of the connection between the evolution of coastal lakes and climatic changes on the basis of a multi-proxy study of lake sediments has been considered (Lozhkin et al., 2022; Nazarova et al., 2023, etc.). At the same time, the issues related to the Holocene atmospheric circulation anomalies near the northern limit of the East Asian monsoon are poorly developed. The aim of the present work is to provide new information on the relationship between the development of lakes on the sea coast of the southern Far East and hydroclimatic changes associated with the intensity of the summer monsoon and cyclogenesis activity, as well as to reveal the influence of catastrophic events (volcanic ash falls and paleotsunami) on the development of the lake ecosystems.

2. Materials and methods

The objects of study were sections of palaeo-lake sediments and peatlands around modern lakes in Primorye (9 sections) and in the Southern Kurils (Urup, Iturup, Kunashir, Shikotan, and Zeleny islands – 8 sections). Lithological, diatom, and pollen analyses were carried out. The chronology is based on radiocarbon dating performed at the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University (St. Petersburg), and the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow), as well as tephrostratigraphy. Bayesian age models were constructed using the Bacon modeling program 4.2.2 in R. The tephra source was referenced to the chemical composition of volcanic glass determined at the V.G. Khlopin Radium Institute (St. Petersburg). The sections were studied along the profiles with leveling, and tsunami sediments were identified, the marine genesis of which was confirmed by diatom analysis.

3. Results and Discussion

Coastal barrier lakes in the southern Far East are the final stage of development of lagoons formed in different phases of the Holocene transgression. Palaeo-lakes are often found, the location of which is well

*Corresponding author.

E-mail address: nadyar@tigdvo.ru (N.G. Razjigaeva)

Received: June 01, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



expressed in the relief and occupied by bog communities. As a rule, organogenic sedimentation took place in such lakes. The development of accumulative forms occurred when sea level stabilized or declined slightly in the middle to late Holocene. On the Kuril Islands, lakes at the mouths of small rivers were formed by rapid overtopping of the watercourse mouths during extreme storms and did not pass through the lagoonal stage. Such a mid-Holocene palaeo-lakes were studied at the mouth of the Lesnaya River on Kunashir Island and on Aerodromnaya Bay, Shikotan Island. The lakes and surrounding vegetation were responsive to hydroclimatic changes, and events up to 80–100 years were highlighted, manifested in neighboring regions (Park et al., 2021). Short-time warming events were distinguished by decreases in arcto-boreal diatoms and an increased role of broadleaved species in forest vegetation. Highlighted events were compared to changes in solar radiation (Steinhilber et al., 2009) and Pacific Ocean surface temperature (SST) in the western tropical zone (Stott et al., 2004). One of the factors influencing hydroclimatic events was the activation of El Niño (Park et al., 2021).

In the south of Primorye, the stages of lake development were established and the factors determining their evolution were determined. The watering and depth of lakes were controlled, first of all, by the change of moistening associated with the amount of atmospheric precipitation. The lakes of the lagoon type underwent up to 6–8 stages of development closely related to sea level fluctuations. Thus, in the water body on the coast of the Krasnaya Bay (Russky Island), the highest salinity was recorded at the peak of the Holocene transgression, the brackish lake developed from ~5090 yr BP, and the reservoir became fresh ~4090 yr ago. Sedimentation rates decreased sharply ~3510 yr BP, that coincided with long dry period associated with weakening of the summer monsoon (Chen et al., 2015). Biogenic sedimentation began ~700 yr BP, and the reservoir became a marsh ~270 yr ago. Seawater invasions to the paleo-lake occurred during extreme storms and tsunamis. The palaeo-lakes on Peschany Peninsula and Shkot Island were formed due to the interlocking of two spits during the sea level decrease in the second half of the middle Holocene. On the Peschany Peninsula, the lake was formed during insignificant cooling ~6320 yr BP. It passed through 8 stages of development and existed until the middle of the late Holocene. Periods of cyclogenesis intensification, when terrigenous material was supplied to the reservoir, are distinguished. Redeposited freshwater diatoms from Cenozoic sub-basalt sediments were used as bioindicators of planar flushing activation during typhoons. Flushing was most active during the warm phases of the early Late Holocene. The drying phases of the reservoir coincided with cold events and were associated with a decrease in the intensity of the summer monsoon. Overgrowing of the palaeo-lake began ~5410 yr BP. The introduction of marine and brackish-water diatoms into the reservoir took place during extreme storms and tsunamis. Tsunami sands have been found only in sections of lacustrine sequences of Eastern Primorye.

In the south of the Kurils, two sections of palaeo-lakes sediments were found on the coast, which developed since the Late Glacial, when there was a land bridge connecting the Kurils and Hokkaido. On Kunashir Island, the palaeo-lake existed since 14 ka, and the water body passed through 14 stages of development. At the initial stage, diatomites were accumulated due to volcanic ash falls. Increased precipitation and wetter conditions were present from 10460–9690 yr BP. There was probably an increase in winter precipitation, as recorded in the growth of shrub pine pollen (*Pinus s/g Haploxylon*). The increase in river flow to the lake indicates more intensive cyclogenesis. On Zelenyi Island, the history of the coastal lake was reconstructed, the development of which was controlled not only by changes in hydration and sea level fluctuations, but also by tsunamis (Razjigaeva et al., 2022). The environmental conditions were influenced by neotectonic movements with a dipping trend and volcanic ash falls. The sources of tephra were Hokkaido volcanoes. The section includes some layers of tsunami sands. The lake formed ~13 ka ago and went through 12 stages of development. In the Younger Dryas, dry and wet phases are distinguished. The reservoir had its maximum depth at the beginning of the Holocene after the deposition of a thick tephra layer. Three phases of lake transformation into a lagoon have been identified, resulting from the destruction of the barrier landform during major tsunamis. Except for these cases, climate was the main factor leading to the sedimentary environment changes. An increase in humidification in the southern Kuril occurred around 5200–5100 yr BP and especially from 4340 yr BP, accompanying the beginning of a decreasing trend in SST in the western tropical Pacific (Stott et al., 2004). During this period, the role of the meridional atmospheric circulation and extratropical cyclogenesis in the northwestern part of the ocean and the Far East marginal seas increased.

4. Conclusions

The study of lake sediments has made it possible to identify a complex, short-time climatic rhythmic, that is important for understanding the interaction of factors determining climate in the transition zone “continent-ocean”. The lake records show that paleoclimatic wetting/drought anomalies on the islands were, in most cases, in antiphase with events in the continental part of the southern Far East. On the islands, the decrease in humidification occurred during periods of predominance of zonal types of atmospheric circulation. The increase of evaporation in warm periods resulted in more dry conditions. Cold periods with humidification anomalies of different signs were established on the islands and at the continental margin. It is assumed that the main cause was a change in the intensity and tracks of extratropical and tropical cyclones. The decrease in moisture content in the region is recorded in the global cooling of 2800–2500 yr BP; the Little Ice Age was wet both on the continental margin and on the islands. Lake sequences include interlayers of tsunami sands, which enabled the compilation of an event chronicle

for the past 3.5 ka in Primorye and 7 ka in the Southern Kurils. Sea water input during strong storms has been recorded.

Acknowledgements

The authors thank our colleagues for help in the field work. This research was performed in the framework of the state budget theme 122020900184-5 (Pacific Geographical Institute FEB RAS).

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

References

- Chen F., Xu Q., Chen J. et al. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Report* 5: 11186. DOI: [10.1038/srep11186](https://doi.org/10.1038/srep11186)
- Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P.M. et al. 2022. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East). *Boreas* 51(2): 364–384. DOI: [10.1111/bor.12565](https://doi.org/10.1111/bor.12565)
- Nazarova L., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A. et al. 2023. The Middle to Late Holocene environments on the Iturup Island (Kurils, North Western Pacific). *Quaternary International* 644–645: 5–20. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.05.003](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.003)
- Park J., Park J., Yi S. et al. 2021. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene* 31(9): 1489–1500. DOI: [10.1177/09596836211019115](https://doi.org/10.1177/09596836211019115)
- Razhigaeva N.G., Grebennikova T.A., Ganzey L.A. et al. 2022. Response of the lake ecosystem of the Lesser Kuril Ridge to paleoclimatic and seismic Events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 58(11): 1377–1397. DOI: [10.1134/S0001433822110068](https://doi.org/10.1134/S0001433822110068)
- Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysics Research Letters* 36(19): L19704. DOI: [10.1029/2009GL040142](https://doi.org/10.1029/2009GL040142)
- Stott L., Cannariato K., Thunell R. et al. 2004. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature* 431: 56–59. DOI: [10.1038/nature02903](https://doi.org/10.1038/nature02903)

Береговые озера юга Дальнего Востока: воздействие климатических изменений и запись природных опасных событий



Разжигаева Н.Г.*, Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Макарова Т.Р.

Тихоокеанский институт географии ТИГ ДВО РАН, ул. Радио, 7, Владивосток, 690041, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучение отложений береговых озер и палеоозер юга Дальнего Востока позволило выделить ряд короткопериодных палеоклиматических событий в переходной зоне. На юге Курил найдены палеоозера, которые существовали с позднеледниковья. Большинство озер имеет лагунное происхождение и образовалось при стабилизации уровня моря или его небольшом снижении в голоценовую трансгрессию. Наиболее детальные данные по изменению увлажнения получены для среднего-позднего голоцена. Большую роль в эволюции водоемов играли интенсивность летнего муссона и особенности циклогенеза, связанные с аномалиями в океане и атмосфере Азиатско-Тихоокеанского региона. Заплеск морской воды в водоемы происходил во время экстремальных штормов и цунами.

Ключевые слова: эволюция озер, гидроклиматические изменения, вулканические пеплопады, цунами, экстремальные шторма, голоцен

Для цитирования: Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Мохова Л.М., Макарова Т.Р. Береговые озера юга Дальнего Востока: воздействие климатических изменений и запись природных опасных событий // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 600-605. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-600

1. Введение

Береговые озера широко распространены на побережье юга Дальнего Востока. Их эволюция связана с климатическими изменениями, а осадки являются одними из наиболее информативных палеоархивов для реконструкций развития природной среды. Развитие озер на побережье тесно связано с колебаниями уровня моря и литодинамическими процессами в береговой зоне, а также проявлением опасных гидрологических событий: экстремальных штормов и цунами. Выявление связи эволюции береговых озер с климатическими изменениями на основе комплексного изучения озерных осадков рассмотрено (Lozhkin et al., 2022; Nazarova et al., 2023 и др.). Вместе с тем вопросы, касающиеся аномалий атмосферной циркуляции в голоцене у северной границы распространения восточноазиатского муссона слабо разработаны. Цель настоящей работы – представить новую информацию о связи развития озер морского побережья юга Дальнего Востока с гидроклиматическими изменениями, связанными с интенсивностью летнего муссона и активностью циклогенеза, а также выяв-

ление влияния катастрофических событий (вулканические пеплопады и палеоцунами) на развитие озерных экосистем.

2. Материалы и методы

Объектами изучения были разрезы отложений палеоозер и болотных массивов в обрамлении современных озер в Приморье (9 разрезов) и на Южных Курилах (о-ва Уруп, Итуруп, Кунашир, Шикотан, Зеленый – 8 разрезов). Проведены литолого-фациальный диатомовый и спорово-пыльцевой анализы. Хронология основана на данных радиоуглеродного датирования, выполненного в Институте наук о Земле СПбГУ (г. Санкт-Петербург) и ГИН РАН (г. Москва), и тефростратиграфии. Возрастные модели построены по программе Vascon 4.2.2. Привязка источника тефры сделана по химическому составу вулканического стекла, определенному в Радиовом институте им. В.Г. Хлопина (г. Санкт-Петербург). Разрезы изучались по профилям с проведением нивелирования, с выделением отложений цунами, морской генезис которых подтверждался диатомовым анализом.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: nadyar@tigdvo.ru (Н.Г. Разжигаева)

Поступила: 01 июня 2024; **Принята:** 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



3. Результаты и обсуждение

Береговые барьерные озера юга Дальнего Востока, являются завершающей стадией развития лагун, образованных в разные фазы голоценовой трансгрессии. Часто встречаются палеозера, местоположение которых хорошо выражено в рельефе и занято болотными сообществами. Как правило, в таких озерах шло органогенное осадконакопление. Развитие аккумулятивных форм происходило при стабилизации уровня моря или при его небольшом снижении в среднем-позднем голоцене. На Курильских островах в приустьевых частях низкопорядковых водотоков озера возникали за счет быстрого перекрытия устья водотоков во время экстремальных штормов и не проходили лагунной стадии. Такое среднеголоценовое палеозеро изучено в устье р. Лесная на о. Кунашир и на бух. Аэродромная, о. Шикотан. Озера и окружающая растительность чутко реагировали на гидроклиматические изменения, выделены события вплоть до 80–100-летнего масштаба, проявившиеся в соседних регионах (Park et al., 2021). Короткопериодные потепления выделялись по снижению содержания арктобореальных диатомей и увеличению роли широколиственных пород в лесной растительности. Выделенные события сопоставлены с изменением солнечной радиации (Steinilber et al., 2009) и температуры поверхности Тихого океана (ТПО) в тропической зоне (Stott et al., 2004). Одним из факторов, влияющих на гидроклиматические события, была активизация Эль-Ниньо (Park et al., 2021).

На юге Приморья установлены стадии развития озер и определены факторы, определяющие их эволюцию. Обводнение и глубина озер контролировалась, в первую очередь, изменением увлажнения, связанного с количеством атмосферных осадков. Озера лагунного типа прошли до 6–8 стадий развития тесно связанных с колебаниями уровня моря. Так в водоеме на побережье бух. Красной (о. Русский) наибольшая соленость отмечена на пике голоценовой трансгрессии, солоноватое озеро развивалось с ~5090 кал. л.н., водоем стал пресным ~4090 кал. л.н. Скорости осадконакопления резко снизились ~3510 л.н., что совпало с сухим периодом, связанным с уменьшением интенсивности летнего муссона (Chen et al., 2015). Биогенное осадконакопление началось ~700 л.н., водоем превратился в болото ~270 кал. л.н. Заплеск морской воды в палеозеро происходил во время экстремальных штормов и цунами. На п-ве Песчаный и о. Шкота палеозера образовались за счет смыкания кос с двусторонним питанием при снижении уровня моря во второй половине среднего голоцена. На п-ове Песчаный озеро образовалось при незначительном похолодании ~6320 л.н., прошло 8 этапов развития и существовало до середины позднего голоцена. Выделены периоды усиления циклогенеза, когда в водоем поставлялся терригенный материал. Переотложенные пресноводные диатомей из подбазальтовых отложений использовались, как биоиндикаторы активизации плоскостного смыва во время тайфунов. Наиболее активным плоскостной

смыв был в теплые фазы начала позднего голоцена. Фазы иссушения водоема совпадали с похолоданиями и связаны с снижением интенсивности летнего муссона. Заращение палеозера началось ~5410 л.н. Занос в водоем морских и солоноватоводных диатомей проходил в экстремальные шторма и цунами. Цунамигенные пески найдены только в разрезах озерных отложений Восточного Приморья.

На юге Курил на побережье обнаружены два разреза палеозер, которые развивались с позднеледниковья, когда существовал сухопутный мост, соединявший Курилы и Хоккайдо. На о. Кунашир палеозеро существовало 14 тыс. лет, водоем прошел 14 стадий развития. На начальном этапе накапливались диатомиты, что было связано с вулканическими пеплопадами. Рост количества атмосферных осадков и более влажные условия были 10460–9690 л.н. Вероятно, увеличивалось количество зимних осадков, зафиксированное в росте пыльцы кедрового стланика. Увеличение речного стока и проточности озера свидетельствует о более интенсивном циклогенезе. На о. Зеленый восстановлена история берегового озера, развитие которого контролировалось не только изменением увлажнения и колебаниями уровня моря, а также цунами (Разжигаева и др., 2022). На экологическую обстановку оказывали влияние неотектонические движения с тенденцией к погружению и вулканические пеплопады. Источниками тефры были вулканы Хоккайдо. Разрез включает прослой цунамигенных песков. Озеро образовалось около 13000 л.н. и прошло 12 стадий развития. В позднем дриасе выделяется сухая и влажная фазы. Максимальную глубину водоем имел в начале голоцена после выпадения большого объема тефры. Установлены три фазы, когда озеро превращалось в лагуну, вызванные разрушением пересыпи во время крупных цунами. За исключением этих случаев, основным фактором, приводящим к изменению обстановок, был климат. Рост увлажнения на юге Курил произошел около 5200–5100 л.н. и особенно с 4340 л.н., сопутствующий началу тренда уменьшения ТПО на западе тропической зоны Тихого океана (Stott et al., 2004). В этот период усиливалась роль меридиональной циркуляции атмосферы и внетропического циклогенеза в северо-западной части океана и дальневосточных окраинных морях.

4. Заключение

Изучение озерных отложений позволило выделить сложную короткопериодную климатическую ритмику, что важно для понимания сложного взаимодействия факторов, определяющих климат в переходной зоне. Озерные летописи показывают, что палеоклиматические аномалии увлажнения/засух на островах в большинстве случаев оказались в противофазе с событиями в континентальной части юга Дальнего Востока. На островах уменьшение увлажнения происходило в периоды преобладания зональных типов циркуляции атмосферы. Увеличение испарения в теплые периоды приво-

дило к более засушливым условиям. Установлены холодные периоды с аномалиями увлажнения разных знаков на островах и на окраине континента. Предполагается, что основной причиной было изменение интенсивности и траекторий перемещения внетропических и тропических циклонов. Снижением увлажнения в регионе зафиксировано в глобальное похолодание 2800–2500 л.н., малый ледниковый период был повсеместно влажным. Озерные разрезы включают прослойки цунамигенных песков, позволивших составить летопись событий в Приморье за последние 3.5 тыс. лет, а на Южных Курилах за 7 тыс. лет. Зафиксирован заплеск морской воды во время сильных штормов.

Благодарности

Авторы благодарят коллег, участвовавших в полевых работах. Исследование выполнено в рамках государственного задания ТИГ ДВО РАН 122020900184-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Разжигаева Н.Г., Гребенникова Т.А., Ганзей Л.А. и др. 2022. Отклик озерной экосистемы Малой Курильской гряды на палеоклиматические и сейсмические события. *Геофизические процессы и биосфера* 21(4): 53–73. DOI: [10.21455/GPB2022.4-4](https://doi.org/10.21455/GPB2022.4-4)

Chen F., Xu Q., Chen J. et al. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Report* 5: 11186. DOI: [10.1038/srep11186](https://doi.org/10.1038/srep11186)

Lozhkin A.V., Cherepanova M.V., Anderson P.M. et al. 2022. Glukhoye Lake: Middle to Late Holocene environments of Kunashir Island (Kuril Archipelago, Russian Far East). *Boreas* 51(2): 364–384. DOI: [10.1111/bor.12565](https://doi.org/10.1111/bor.12565)

Nazarova L., Razjigaeva N.G., Ganzey L.A. et al. 2023. The Middle to Late Holocene environments on the Iturup Island (Kurils, North Western Pacific). *Quaternary International* 644–645: 5–20. DOI: [10.1016/j.quaint.2021.05.003](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.05.003)

Park J., Park J., Yi S. et al. 2021. Holocene hydroclimate reconstruction based on pollen, XRF, and grain-size analysis and its implications for past societies of the Korean Peninsula. *The Holocene* 31(9): 1489–1500. DOI: [10.1177/09596836211019115](https://doi.org/10.1177/09596836211019115)

Steinhilber F., Beer J., Fröhlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysics Research Letters* 36(19): L19704. DOI: [10.1029/2009GL040142](https://doi.org/10.1029/2009GL040142)

Stott L., Cannariato K., Thunell R. et al. 2004. Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature* 431: 56–59. DOI: [10.1038/nature02903](https://doi.org/10.1038/nature02903)

Postglacial peat accumulation in the interfluvium of the Mologa and Sheksna rivers (NW East European Plain)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYSadokov D.O.^{1*}, Tsyganov A.N.², Pastukhova Yu.A.², Mazei N.G.², Mazei Yu.A.^{1,2}¹ Shenzhen MSU-BIT University, International University Park Road, 1, Dayun New Town, Longgang District, Shenzhen, Guangdong Province, 518172, P.R. China² Lomonosov Moscow State University, Leninskiye gory, 1, Moscow, 119234, Russia

ABSTRACT. The Mologa-Sheksna Lowland peatlands represent incredibly valuable archives of information for reconstruction of the Holocene regional palaeoenvironmental dynamics. A profound application of multiproxy techniques (AMS dating, XRF scanning, testate amoebae and loss on ignition analyses), coupled with a palaeogeographical review, enabled us to perform a robust reconstruction of peat deposition and main palaeoenvironmental milestones during the Holocene. Peat accumulation started ~11.0 cal. ka BP over the upland watershed areas, preceded by mineral lacustrine sedimentation. In smaller enclosed basins, peat accumulation took place from ~8.7 cal. ka BP. Oscillations in accumulation rates and decomposition degree of peat along the cores provide evidence for dry Middle Holocene (8.6–4.4 cal. ka BP) and a 2-ka time lag in oligotrophic peat deposition onset between the two different geomorphological localities.

Keywords: peatlands, Mologa-Sheksna lowland, Late Holocene, testate amoebae, x-ray fluorescence

For citation: Sadokov D.O., Tsyganov A.N., Pastukhova Yu.A., Mazei N.G., Mazei Yu.A. Postglacial peat accumulation in the interfluvium of the Mologa and Sheksna rivers (NW East European Plain) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 606-611. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-606

1. Introduction

Holocene palaeoenvironmental evolution of the boggy plains in the central Mologa-Sheksna Lowland (MSL) is poorly investigated. Large palaeolakes occupied the area in the postglacial time, but their configuration and timing remain unclear. Little and scarce data has been obtained recently for the small lakes of the MSL, that enabled to reconstruct mainly Late Glacial sedimentation patterns. The region is very diverse in terms of palaeohydrological dynamics, which conditioned the bog formation greatly. The research is aimed at providing evidence for, and interpretation of peat accumulation variance in the context of regional palaeo-landscape evolution.

2. Materials and methods

Peat sequences were obtained from the central parts of the bogs “Koporskiy Mokh” (N 58.55954° E 37.98909°) and “Bolshoy Mokh” (N 58.54343° E 37.56911°). Both sampling sites are located within the

water divide of the rivers Mologa and Sheksna (Fig. 1) in Darwin Nature Biosphere Reserve (NW of the East-European Plain). The area is characterized by intensive development of mires. Ombrotrophic peatlands are the most typical landscape element in the area. Core sampling was performed using a Russian half-cylindrical peat corer (chamber width 5 cm, length 100 cm). Right after extraction, the cores were photographed, packed into plastic tubes and rolled with film and sticky tape.

The intact cores were XRF-scanned on GeotekCoreWorkstation (MSCL-XYZ) (Rh-anode, resolution 4 mm). After that, the cores were cut to contiguous samples by 1 cm. AMS¹⁴C age values were obtained for 5 samples from the Koporskiy Mokh, and for 7 samples from Bolshoy Mokh deposits (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), and calibrated with the use of the IntCal20 calibration curve. Additionally, analyses of testate amoebae (TA) community composition, and loss on ignition (LOI) (550°C) measurements were carried out for the cores from the Koporskiy Mokh.

*Corresponding author.

E-mail address: dmitriisadokov@gmail.com (D.O. Sadokov)

Received: June 10, 2024; Accepted: July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



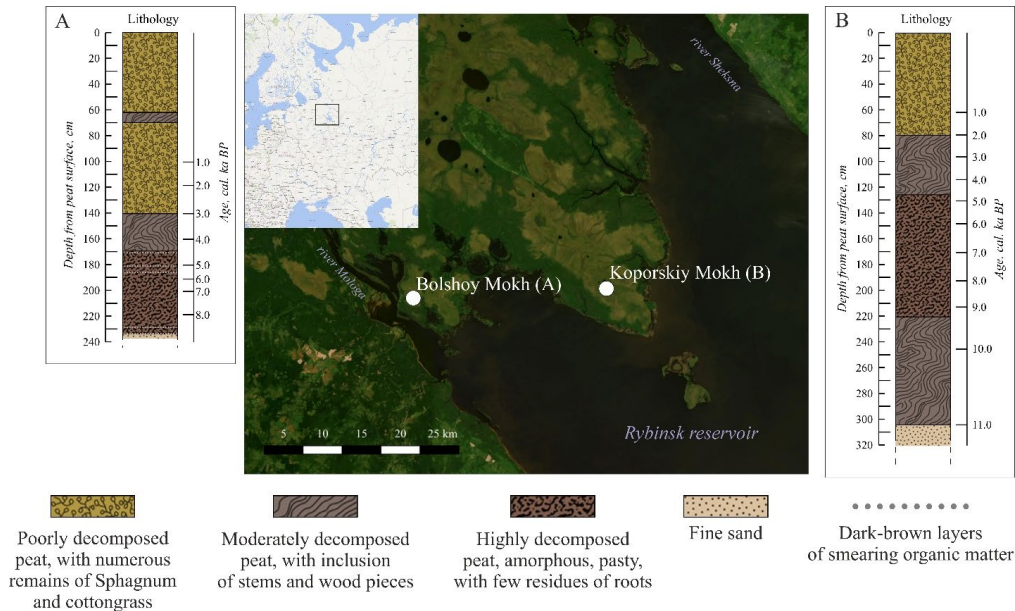


Fig.1. Geographical position of the peat sampling sites (center), lithology and chronostratigraphy of the studied peat deposits from the mires Bolshoy Mokh (A) and Koporskiy Mokh (B).

3. Results and discussion

A sequence of total thickness 320 cm was obtained from the bog “Koporskiy Mokh” in 2021. The oldest strata of silty gyttja, dating back to ~11.2 cal. ka BP, are underlain by fine sand, which is typical for the regional lacustrine-alluvial plain. Geochemical signal (Fe, Ti, K and Si content) provides reliable evidence for the shift from the mineral to organic sedimentation regime, i.e. from a shallow waterlogged lake to a mire, which is a characteristic feature of the Pleistocene / Holocene transition in the area (Sadokov et al., 2022). Additionally, a bioproductivity increase has been noticed for the period 11.0–10.5 cal. ka BP, as derived from ratio $Ca/(Al + Ti + Fe)$ plot and LOI analysis (values raised abruptly from 3% to 93%). The highest peat accumulation rate at Koporskiy Mokh site – 0.5 mm/yr – was determined for the deepest part of the record (11.0 – 9.3 cal. ka BP), then dropped to 0.2 mm/yr and remained at this level during 9.3 – 2.0 cal. ka BP. From ~2.0 cal. ka BP until the present day, peat accumulation rate has been around 0.3–0.4 mm/yr.

Peat sequence from the bog “Bolshoy Mokh”, 237 cm long in total, was obtained in 2022. The age of oldest organic-rich peaty silt was determined as ~8.7 cal. ka BP. The underlying sandy strata had not been retrieved with the corer, but nevertheless, the lowermost peat layers showed notably greater mineral matter content than above, which implies basal bedding of fine sand. This was evidenced by a prominent decline in the composition of mineragenic elements (Fe, Ti) at the bottom, which reflects a transition from enhanced mineral input into the basin to clearly organic sedimentation type. Peat decomposition rate changes upwards from highly humified (8.7–4.4 cal. ka BP, accumulation rate 0.1–0.2 mm/yr) to moderately decomposed (4.4–3.0 cal. ka BP, accumulation rate 0.2 mm/yr), and to poorly decomposed peat (since ~4.4 cal. ka BP, accu-

mulation rate 0.4–0.5 mm/yr). Several pronounced dark-brown layers of smearing organic matter (OM) were observed in the lower part of the sequence within the unit of highly decomposed peat deposits. Visually, these layers have been corresponded to fire events.

A transition from lacustrine to peat sedimentation conditions was traced in the Koporskiy Mokh sequence for the Early Holocene, which is characteristic of stepwise palaeolake drainage, that previously had been covering the central MSL. Presumably, this drainage occurred rapidly 11.2–11.0 cal. ka BP, as derived from the change from mineral to organic deposition, and was followed by progressive peat accumulation (as stated previously by Denisenkov et al., 1976). A short-term period of relatively stable lake level stand at the Koporskiy Mokh site was noticed ~11.1 cal. ka BP (also seen in core lithology as layers of peaty silt), which supposedly lasted less than 100 years. This halt agrees with the course of the overall lacustrine drainage at the Holocene onset reconstructed from the Lake Khotavets sediments (basin of river Mologa) (Sadokov et al., 2022).

The main difference between the studied sites is that peat deposition at the Bolshoy Mokh started much later (~8.7 cal. ka BP) than at the Koporskiy Mokh (~11.0 cal. ka BP). It is likely that this discrepancy can be explained by differences of geomorphological setting between the two sites, i.e., the regional flat watershed area (for the Koporskiy Mokh) and well-drained lacustrine delta terrain (for the Bolshoy Mokh).

Both investigated sequences exhibit features of climate drying during the Middle Holocene (8.8/8.6–4.4 cal. ka BP). This evidence is supported mainly by similarity of highly decomposed peat structure from both sites, by testate amoeba community structure that signals of decreased water table depth at the Koporskiy Mokh, and by a series of supposedly fire-induced layers in the Bolshoy Mokh sequence.

Overall oligotrophization of the mires in the interfluvium of the rivers Mologa and Sheksna occurred widely in the Late Holocene, but with a time lag between the localities. Thus, high accumulation rate of poorly decomposed (or almost undecomposed) peat was traced from ~4.4 cal. ka BP for the Bolshoy Mokh and from ~2.0 cal. ka BP for the Koporskiy Mokh, until nowadays. The difference of the ombrotrophic bog stage onset time between the sites may relate to more pronounced internal and surficial runoff, which eventually evolved on the upland watershed of the Koporskiy Mokh, and sustained peat formation with moderate decomposition rate. Thus, by the Late Holocene, the local hydrology caused a 2-ka time lag for the Koporskiy Mokh, in comparison to a steadier peatland development of the Bolshoy Mokh with a smaller local dome.

4. Conclusions

Peat deposition within the central parts of large bogs in the interfluvium of the Mologa and Sheksna rivers started asynchronously between ~11.0 and ~8.7 cal. ka BP. The extensive bogs were preceded by palaeolakes, which drained soon after the Holocene onset. Stepwise palaeolake drainage was recorded in the Mologa-Sheksna central watershed peat sequence in the Early Holocene, with a short stabilization of a shallow lake level ~11.1 cal. ka BP. Dry climate with frequent wildfires is suggested for the Middle Holocene (8.6–4.4 cal. ka BP). The ombrotrophic conditions established

on the bogs of the MSL unequally between ~4.4 and ~2.0 cal. ka BP, which supposedly was caused by local differences in bog hydrology.

Acknowledgements

The authors are grateful to Dr. Dmitriy G. Borisov for assistance with XRF measurements, and to Dr. Andrey V. Kitashov, Dr. Ding Ping for AMS¹⁴C dating. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-14-00065, <https://rscf.ru/project/24-14-00065/>.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Denisenkov V., Kalugina L., Khomutova V. 1976. On the palaeobotanical characteristics of bogs of the central Mologa-Sheksna Lowland. North-West of the European part of the USSR: 10. Problems of palaeogeography and geochronology of the upper Pleistocene and Holocene of the Russian Plain Northwest. 113–122 (In Russian).
- Sadokov D., Sapelko T., Fedorov G. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1562–1564. DOI:[10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562)

Накопление торфа в междуречье рек Мологи и Шексны (СЗ Восточно-Европейской равнины) в послеледниковье

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСадоков Д.О.^{1*}, Цыганов А.Н.², Пастухова Ю.А.², Мазей Н.Г.², Мазей Ю.А.²¹ Университет МГУ-ППИ в Шэньчжэне, улица Гоцзидасюэюань, 1, Даюньсиньчэн, район Лунган, Шэньчжэнь, провинция Гуандун, 518172, КНР² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119234, Россия

АННОТАЦИЯ. Торфяники Молого-Шекснинской низменности представляют собой ценные палеоархивы, содержащие большой объем информации для реконструкции региональной голоценовой палеоэкологической динамики. Благодаря применению большого количества аналитических методов (AMS датирование, РФА сканирование, анализ раковинных амёб и потерь при прокаливании), совместно с палеогеографическим обзором, была выполнена реконструкция динамики торфообразования и основных палеоэкологических изменений в голоцене. На водораздельных участках накопление торфа началось ~11.0 кал.тыс.л.н., сменив минерагенную озерную седиментацию. В малых замкнутых котловинах начало накопления торфа фиксируется с ~8.7 кал.тыс.л.н. Колебания скорости торфообразования, степени разложения торфа, изменения в структуре сообщества раковинных амёб и обнаружение характерных минеральных текстур в изученных колонках позволили реконструировать сухие условия в среднем голоцене (8.6-4.4 кал.тыс.л.н.) и задержку в наступлении олиготрофной стадии развития болот (на 2 тысячи лет) для участков в разных геоморфологических условиях.

Ключевые слова: торф, Молого-Шекснинская низменность, голоцен, раковинные амёбы, рентгенофлуоресцентный анализ

Для цитирования: Садоков Д.О., Цыганов А.Н., Пастухова Ю.А., Мазей Н.Г., Мазей Ю.А. Накопление торфа в междуречье рек Мологи и Шексны (СЗ Восточно-Европейской равнины) в послеледниковье // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 606-611. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-606

1. Введение

Природно-климатическая динамика заболоченных равнин центра Молого-Шекснинской низменности (МШН) в голоцене практически не изучена. Крупные палеоозёра занимали территорию низменности в послеледниковое время, однако их конфигурация в пространстве и во времени остаются не исследованными. В последние годы были получены новые результаты по отдельным малым озерам МШН, что позволило реконструировать прежде всего особенности седиментации в позднеледниковье, однако этих данных недостаточно для понимания голоценовой эволюции торфяников. В различных секторах участка исследования характерным образом проявлялась разная палеогидрологическая динамика, что в значительной степени обусловило развитие торфяников. Цель исследования заключается в интерпретации изменений

в динамике накопления торфа в контексте региональной эволюции палеоландшафтов.

2. Материалы и методы

Колонки торфяных отложений были получены в центральных частях болот «Копорский Мох» (58.55954° с.ш., 37.98909° в.д.) и «Большой Мох» (58,54343° с.ш., 37,56911° в.д.). Оба участка расположены в междуречье рек Мологи и Шексны (Рис. 1), в Дарвинском государственном природном биосферном заповеднике (северо-запад Восточно-Европейской равнины). Территория междуречья сильно заболочена, в основном, верховыми торфяниками. Отбор кернов торфяных отложений выполнялся с использованием русского полуцилиндрического бура (диаметр пробоотборника 5 см, длина – 100 см). Сразу после отбора керны фотографиро-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dmitriisadokov@gmail.com (Д.О. Садоков)

Поступила: 10 июня 2024; **Принята:** 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



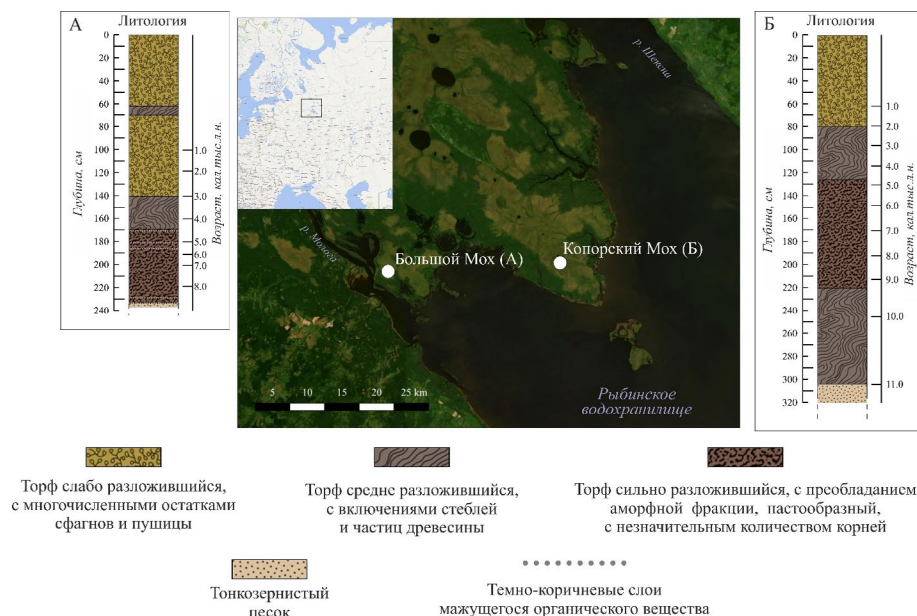


Рис.1. Географическое положение участка отбора образцов торфа (в центре). Литология и хроностратиграфия изученных торфяных отложений с болот «Большой Мох» (А) и «Копорский Мох» (Б).

вались, обрачивались в полиэтиленовую пленку и упаковывались в пластиковые трубы.

Рентгенофлуоресцентное (РФА) сканирование целых кернов выполнялось на оборудовании GeotekCoreWorkstation (MSCL-XYZ) (Rh-анод, разрешение 4 мм). После этого керны были разделены на образцы по 1 см. Определение возраста выполнялось методом AMS¹⁴C в Институте геохимии Гуанчжоу (Китайская Академия наук), для 5 образцов с болота Копорский Мох и для 7 образцов с болота Большой Мох. Полученные значения возраста были откалиброваны с использованием калибровочной шкалы IntCal20. Для образцов с болота Копорский Мох также были выполнены анализы структуры сообщества раковинных амёб (РА) и потерь при прокаливании (ППП) при 550°C.

3. Результаты и обсуждение

На участке Копорский Мох в 2021 году была получена колонка отложений общей мощностью 320 см. Наиболее древние горизонты, представленные алевритистой гиттией, имеют возраст ~11.2 кал.тыс.л.н., и подстилаются супесями, что характерно для местных озерно-аллювиальных равнин. По геохимическому сигналу (содержание Fe, Ti, K и Si) надежно определяется смена режима осадконакопления с минерагенного на органогенное. Это, в свою очередь, соотносится с переходом мелководного зарастающего озера в торфяно-болотную стадию, что по времени и характеру изменений согласуется с известными региональными реконструкциями на этапе завершения плейстоцена и начала голоцена (Sadokov et al., 2022). Кроме того, по результатам применения соотношения Ca/(Al+Ti+Fe) и ППП (рост значений с 3% до 93%) 11.0- 10.5 кал.тыс.л.н. отмечается увеличение палеобиопродуктивности и накопления органического вещества. Наибольшая скорость торфонакопления

для Копорского Мха (0.5 мм/год) была получена для самой глубокой части разреза (11.0-9.3 кал.тыс.л.н.), после чего скорость снизилась до 0.2 мм/год и оставалась на этом уровне в течение времени 9.3- 2.0 кал.тыс.л.н. Начиная с ~2.0 кал.тыс.л.н. и до настоящего времени скорость накопления торфа составляет 0.3-0.4 мм/год.

Колонка торфа с болота Большой Мох общей мощностью 237 см была отобрана в 2022 году. Биогенные (торф и торфосапропель) отложения на этом участке охватывают временной интервал до ~8.7 кал.тыс.л.н. Подстилающие песчаные слои не были отобраны в ходе бурения, однако их близость подтверждается наличием значительно большего количества минерального вещества в нижних горизонтах колонки. Также, резкий спад содержания минерагенных химических элементов (Fe, Ti), при движении от основания колонки вверх, отражает переход от активного привноса минерального материала в бассейн к типично органогенному седиментогенезу. Степень разложения торфа изменяется снизу вверх, от хорошо разложившегося (8.7- 4.4 кал.тыс.л.н., скорость накопления 0.1-0.2 мм/год) к умеренно разложившемуся (4.4- 3.0 кал.тыс.л.н., скорость накопления 0.2 мм/год), и к слабо разложившемуся до практически неразложившегося торфа (с ~4.4 кал.тыс.л.н. до наших дней, скорость накопления 0.4-0.5 мм/год). В нижней части колонки выделяются несколько заметных темно-коричневых слоев мажущегося органического вещества (ОВ), в составе фации хорошо разложившегося торфа (Рис. 1). По визуальноему обследованию эти слои были приняты за следы пожаров (насыщенные углями).

В раннем голоцене в отложениях с Копорского Мха отмечается переход от озерных к торфяно-болотным условиям седиментации, что сможет быть сопоставлено с постепенным дренированием одного из крупных палеозер, существовавших в центре

МШН в позднем плейстоцене. Предположительно, дренирование было стремительно направленным около 11.2- 11.0 кал.тыс.л.н. На это указывает характер смены режима седиментогенеза, а также последовавшее прогрессивное накопление торфа (на что ранее указывали Денисенков и др., 1976). В течение короткого периода ~11.1 кал.тыс.л.н., длительность которого, по всей видимости, не превышала 100 лет, была зафиксирована кратковременная стабилизация уровня палеоводоёма (что также выражено в литологии в виде тонкого прослоя торфосапропеля). Эта приостановка спада уровня на фоне общей направленной древнеозерной регрессии в начале голоцене, корректно соотносится с аналогичными выводами, сделанными при исследованиях донных отложений озера Хотавец (бассейн р. Мологи) (Sadokov et al., 2022).

Основная разница в ходе биогенной седиментации между двумя обследованными участками заключается в том, что на болоте Большой Мох торфонакопление началось значительно позже (~8.7 кал.тыс.л.н.), чем на болоте Копорский Мох (~11.0 кал.тыс.л.н.). Вероятно, эти различия могут быть объяснены разницей в геоморфологических характеристиках обоих участков, а именно – приуроченности Копорского Мха к плоской водораздельной поверхности более высокой ступени рельефа, в отличие от Большого Мха, занимающего хорошо дренируемые участки озёрной дельты с более динамичными гидрологическими условиями.

В обеих изученных колонках были отмечены признаки наступления засушливых условий в среднем голоцене (8.8 / 8.6- 4.4 кал.тыс.л.н.). В частности, на это указывает сходство структуры хорошо разложившегося торфа на диапазонах глубин, соответствующих представленным датам, а также характеристика сообществ амеб, отражающих понижение уровня болотно-грунтовых вод на участке Копорского Мха, и серия слоёв, ассоциируемых с палеопожарами, в разрезе с болота Большой Мох.

Олиготрофизацию болот в междуречье рек Мологи и Шексны можно считать общерегиональным ландшафтообразующим процессом в позднем голоцене, охватившим практически все болотные массивы, однако, в разные временные промежутки. Так, резкое возрастание темпов накопления слабо разложившегося (или практически неразложившегося) торфа отмечаются между ~4.4 кал.тыс.л.н. для Большого Мха и ~2.0 кал.тыс.л.н. для Копорского мха. Различия в наступлении олиготрофной стадии заболачивания между изученными участками могут быть связаны с более активными процессами болотного и поверхностного (ручьевого) стока, характерно проявившимися на возвышенном водораздельном участке Копорского Мха, которые удерживали болотную систему в мезотрофном состоянии (и способствовали накоплению торфа умеренной степени

разложения). Таким образом, можно предположить, что к позднему голоцену местные гидрологические условия обусловили разницу в 2 тыс.л. в наступлении олиготрофной стадии болота Копорский Мох, в отличие от более направленной эволюции и прироста купольного торфяника Большой Мох, достигшего этой стадии ранее.

4. Заключение

Накопление торфа в центральных частях крупных болот междуречья рек Мологи и Шексны началось асинхронно между ~11.0 и ~8.7 кал.тыс.л.н. Заболачивание началось после дренирования палеоозер в начале голоцена. Последовательное снижение уровня палеоозёр в раннем голоцене отразилось на структуре торфяной залежи центрального водораздела р. Мологи и р. Шексны. В ходе дренирования отмечается короткий эпизод стабилизации древнеозёрного уровня около ~11.1 кал.тыс.л.н. Для среднего голоцена (8.6- 4.4 кал.тыс.л.н.) были реконструированы сухие климатические условия с частыми пожарами. Близкие к современным олиготрофные условия начали устанавливаться на болотах МШН неравномерно, между ~4.4 кал.тыс.л.н. и ~2.0 кал.тыс.л.н., что предположительно было обусловлено местными различиями в гидрологии болот.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Д.Г. Борисову за помощь в выполнении РФА сканирования. Исследование было выполнено в рамках проекта РНФ № 24-14-00065, <https://rscf.ru/project/24-14-00065/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Денисенков В.П., Калугина Л.В., Хомутова В.И. 1976. О палеоботанической характеристике болот центральной части Молого-Шекснинской низменности. Северо-Запад европейской части СССР. Вып. 10. Проблемы палеогеографии и геохронологии верхнего плейстоцена и голоцена Северо-Запада Русской равнины. 113-122.

Sadokov D., Sapelko T., Fedorov G. 2022. Late-Glacial and Early Holocene history of Lake Khotavets (Mologa-Sheksna Lowland, NW Russia): a geodiversity conservation case study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1562-1564. DOI:[10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1562)

New data on Late Glacial diatoms of the SE Baltic region based on the results of studying the Kulikovo section



Rudinskaya A.I.^{1*}, Druzhinina O.A.², Filippova K.G.¹, Lazukova L.I.¹

¹Institute of Geography RAS, Staromonetny Lane 29b4, Moscow, 119017, Russia

²Herzen State Pedagogical University of Russia, River Moyka Emb., 48, Saint-Petersburg, 191186, Russia

ABSTRACT. The sediments of shallow basins formed along the coast of the Baltic glacial lake around 14,500-14,000 cal BP provide a valuable source of information for reconstructing environmental changes in the Bølling-Allerød. Radiocarbon dating and complex lithological and diatom analyzes were performed for the deposits of one of these paleo-reservoirs, exposed in the Kulikovo section (northern part of the Sambian Peninsula). Diatoms of the sediments formed 14,100 – 13,400 cal BP are mostly presented by benthic and epiphytic oligohalobic species. We compared the obtained data with existing ideas about the Late Glacial diatom flora for this region to identify general and local patterns of diatom communities formed at that time.

Keywords: diatom analysis, paleolimnology, palaeoenvironmental reconstructions, Late Glacial, Sambian Peninsula

For citation: Rudinskaya A.I., Druzhinina O.A., Filippova K.G., Lazukova L.I. New data on Late Glacial diatoms of the SE Baltic region based on the results of studying the Kulikovo section // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 612-617. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-612

1. Introduction

SE Baltic region was covered with glaciers during the LGM (Mangerud et al., 2004). After the deglaciation started around 20,000–19,000 cal BP, the natural environment of this region considerably changed (Veski et al., 2015; Druzhinina et al., 2020). Climatic fluctuations in the Bølling-Allerød and the cooling in the Younger Dryas had a significant impact on the deglaciation process.

The Bølling–Allerød diatoms found in the sediments of large ancient lakes on the territory of modern Lithuania and in the bottom sediments of the Baltic Ice Lake (BIY), are studied in most detail. M.Kabailinė (1968; 2006) developed a regional stratigraphic scheme for the Late Glacial in Lithuania based on diatom data. As a result of studies of the last two decades on the territory of Lithuania (Gaigalas et al., 2008, Šeirienė et al., 2009; Stančikaitė et al., 2008; 2009; 2015) and the study of new sections in Poland and the Kaliningrad region (Witkowski et al., 2009; Druzhinina et al., 2015; 2020; Gałka et al., 2015; Słowinski et al., 2017; Zaretskaya et al., 2023) new data on Late Glacial diatoms were collected.

Fossil diatoms in the sediments of the mentioned sections demonstrates some asynchrony that indi-

cates different timing and force of aquatic ecosystems response to changes in natural conditions. Shallow reservoirs, in particular, the object of this study - the Kulikovo paleoreservoir, with a biota that was sensitive to short-term warming and cooling, as well as to changes in flow, depth and other factors, are the potential source of more detailed information about general and local trends in dynamics natural environment.

2. Materials and methods

The thickness of the sediments exposed in the Kulikovo section is 2 m. Sampling was carried out with the interval of 1-3 cm. To determine the absolute age of the sediments for the entire section (192-0 cm), a series of five radiocarbon dates was obtained. We built an age-depth model based on dating results using the rbacon 3.1.0 program. (Blaauw and Christen, 2011).

We performed a comprehensive lithological analysis – we measured the granulometric composition and magnetic susceptibility (MS) and calculated the content of organic matter and CaCO₃ by loss of ignition (LOI) method.

Diatom analysis was performed for 24 samples from the interval 142-191 cm. Slides were prepared according to the standard procedure (Battarbee et al.,

*Corresponding author.

E-mail address: rudinskaya94@gmail.com (A.I. Rudinskaya)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2001). We add one lycopodium tablet to each sample (Batch 280521 291). The weight concentration of diatoms was calculated using the Battarbee (2001) formula.

3. Results and discussion

The results of radiocarbon dating indicate that the sediments of the studied interval of the Kulikovo section accumulated in the Middle Dryas and the first half of the Allerød, from approximately 14,100 to 13,400 cal BP. Diatoms are not represented in Middle Dryas deposits (14100-13900) - perhaps the conditions were unsuitable for their vegetation or conservation of valves.

The species composition of fossil diatom indicates a shallow depth and an average degree of mineralization at the stage of 13900–13870 cal BP. The palaeo-reservoir trophic status is quite difficult to restore due to the predominance of diatoms indifferent to the trophic status of the habitat. The dominant species *Pseudostaurosira brevistriata* is a pioneer species and indicates alkaline conditions and water rich in oxygen and dissolved calcium. This is also confirmed by the high content of carbonates in the sediment.

In sediments formed at the stage of 1870-1830 cal BP an extremely small number of diatom valves is observed. This does not allow us to make assumptions about the conditions of the palaeo-reservoir. The grain size of the deposits does not show significant differences from those formed earlier. There is a slight increase in the content of organic matter and a decrease in the content of carbonates in the sediment.

The species composition of diatoms indicates a shallow mesotrophic-eutrophic reservoir with low mineralization at the stage of 13830–13750 cal BP. The predominance of benthic species, a decrease in the content of epiphytic diatoms and an increase in the content of valves of oligohalobic halophilous species may indicate an increase in the flow of the paleo-reservoir. The results of a comprehensive lithological analysis are consistent with this assumption: the sediments are characterized by an increased content of the sand fraction and high values of the median particle size.

At the stage of 13750–13640 cal BP, diatoms indicate the shallow depth, eutrophic conditions and low to moderate salinity. Eutrophication of a reservoir may also be indicated by an increase in the content of organic matter in sediment. The predominant species of the genus *Gyrosigma* spp are distinguished by their large valve sizes and are able to live in flowing water. A possible increase in the flow of the reservoir is also indicated by lithological indicators - an increase in the content of the sand fraction, an increase of the median particle size and high MS values.

Diatoms indicates the conditions of a shallow eutrophic reservoir at the stage of 13,640–13,400 cal BP. The predominance of the epiphytic species *Staurosirella ovata* and *Pseudostaurosira brevistriata* may indicate calm hydrodynamic conditions favorable for the development of ribbon-like colonies (Zaretskaya et al., 2023) and a high calcium content in the water.

There is a slight increase in carbonate content (up to 30%) at this stage.

As in most of the considered palaeoreservoirs with a reconstructed shallow depth, mesotrophic and eutrophic fossil diatoms are widely represented in the sediments of the studied interval of the Kulikovo section. In contrast, oligotrophic species predominate in the in Allerød deposits in the lakes with greater depth. The diatom associations of the Kulikovo section, as well as all the considered paleoarchives, are characterized by a predominance of oligohalobic species. This may indicate low mineralization not only in moraine lakes, but also in other isolated or semi-isolated basins located along the coast of the BIL.

4. Conclusion

The significant changes in the fossil diatom species composition established for the Kulikovo section in less than a century indicate the highly dynamic regional and local natural conditions of the Late Glacial. At the same time, the identified stages are characterized by a very short duration, often comparable to the error of radiocarbon dating. This fact confirms the necessity of the most detailed sampling of sedimentary archives to understand the complexity of the processes that formed the natural environment at the end of the Late Pleistocene. At the same time, when constructing regional reconstructions, it is necessary to take into account the possible asynchrony of the development of biological indicators in reservoirs of different areas, depths, and flowability.

5. Acknowledgement

This research was funded by the Russian Science Foundation, project No 22-17-00113 “Crucial time periods and paleoclimatic events of the Late Pleistocene and Holocene and their role in the formation of natural and cultural landscapes of the southeastern Baltic”

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Battarbee R.W., Jones V.J., Flower R.J. 2001. Diatoms. In: Smol J.P., Birks H.J-B., Last W.M. (Eds.) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators. Boston, pp.155–202.
- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3):457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)
- Druzhinina O., Kublitskiy Y., Stančikaitė M. et al. 2020. A new approach based on chironomid, geochemical and isotopic data from Kamyshovoe Lake. *Boreas* 49 (33): 544–561. DOI:[10.1111/bor.12438](https://doi.org/10.1111/bor.12438)
- Druzhinina O., Subetto D., Stančikaitė M. et al. 2015. Sediment record from the Kamyshovoe Lake: history of vegetation during late Pleistocene and early Holocene (Kaliningrad District, Russia). *Baltica* 28 (2):121–134.

- Gaigalas A., Vaikutienė G., Vainorius J. et al. 2008. Development of Lake Rėkyva and its environment in Late Pleistocene and Holocene. *Geologija*: 1 (61): 28–36.
- Gałka M., Tobolski K., Bubak I. 2015. Late Glacial and Early Holocene lake level fluctuations in NE Poland tracked by macro-fossil, pollen and diatom records. *Quaternary International* 388: 23–38. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.03.009](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.009)
- Kabailinė M. 1968. Lake and marine diatoms in the Holocene on the territory of Lithuania. In: *Fossil diatoms of the USSR*. Moscow, pp.102-107. (in Russian)
- Kabailinė M. 2006. Late Glacial and Holocene stratigraphy of Lithuania based on pollen and diatom data. *Geologija* 54: 42–48.
- Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H. et al. 2004. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of Northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23 (11-12): 1313–1332. DOI:[10.1016/j.quascirev.2003.12.009](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.009)
- Šeirienė V., Kabailienė M., Kasperovičienė J. et al. 2009. Reconstruction of postglacial palaeoenvironmental changes in eastern Lithuania: Evidence from lacustrine sediment data. *Quaternary International* 207: 58–68. DOI:[10.1016/j.quaint.2008.12.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.005)
- Słowinski M., Zawiska I., Ott F. et al. 2017. Differential proxy responses to late Allerød and early Younger Dryas climatic change recorded in varved sediments of the Trzechowskie palaeolake in Northern Poland. *Quaternary Science Reviews* 158: 94-106. DOI:[10.1016/j.quascirev.2017.01.005](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.01.005)
- Stančikaitė M., Kisielienė D., Moeb D. et al. 2009. Lateglacial and early Holocene environmental changes in northeastern Lithuania. *Quaternary International* 207: 80–92. DOI:[10.1016/j.quaint.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.10.009)
- Stančikaitė M., Šeirienė V., Kisielienė D. et al. 2015. Lateglacial and early Holocene environmental dynamics in northern Lithuania: A multi-proxy record from Ginkūnai Lake. *Quaternary International* 357: 44-57. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.08.036](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.036)
- Stančikaitė M., Šinkūnas P., Šeirienė V. et al. 2008. Patterns and chronology of the Lateglacial environmental development at Pamerkiai and Kašučiai, Lithuania. *Quaternary Science Reviews* 27: 127–147 DOI:[10.1016/j.quascirev.2007.01.014](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.01.014)
- Veski S., Seppä H., Stančikaitė M. et al. 2015. Quantitative summer and winter temperature reconstructions from pollen and chironomid data between 15 and 8 ka BP in the Baltic-Belarus area. *Quaternary International* 388: 4–11. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.10.059](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.059)
- Witkowski A., Cedro B., Kierzek A. et al. 2009. Diatoms as a proxy in reconstructing the Holocene environmental changes in the south-western Baltic Sea: the lower Rega River Valley sedimentary record. *Hydrobiologia* 631: 155–172. DOI: [10.1007/s10750-009-9808-7](https://doi.org/10.1007/s10750-009-9808-7)
- Zaretskaya N.E., Ludikova A.V., Kuzhetsov D.D., Lugovoy N.N., Uspenskaya O.N., Frolov P.D. 2023. Late Glacial palaeoenvironment and development of proglacial lakes on the northern coast of the Sambian (Kaliningrad) Peninsula. *Geomorfologiya i Paleogeografiya* [Geomorphology and Palaeogeography] 54(4): 7-25. DOI: [10.31857/S2949178923040163](https://doi.org/10.31857/S2949178923040163) (in Russian)

Новые данные о позднеледниковых диатомовых комплексах ЮВ Прибалтики по результатам изучения разреза Куликово

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYРудинская А.И.^{1*}, Дружинина О.А.², Филиппова К.Г.¹, Лазукова Л.И.¹¹Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017, Россия²РГПУ им. А. И. Герцена, Набережная р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

АННОТАЦИЯ. Отложения мелководных бассейнов, сформировавшихся на суше вдоль побережья Балтийского ледникового озера около 14500-14000 календарных лет назад, служат ценным источником информации для реконструкции изменений природной среды в бёллинг-аллерёдском интерстадиале. Для отложений одного из таких палеоводоемов, вскрытых в разрезе Куликово (северная часть Самбийского полуострова), было выполнено радиоуглеродное датирование, комплексный литологический и диатомовый анализы. В результате изучения отложений, охватывающих временной интервал 14100 – 13400 календарных лет назад, установлено, что в составе диатомовых ассоциаций преобладают бентосные виды и обрастатели, относящиеся к группе олигогалобных индифферентов. Полученные данные о диатомовых сообществах были сопоставлены с существующими представлениями о диатомовой флоре позднеледниковья для этого региона, что позволило выявить общие и локальные закономерности формировавшихся в это время диатомовых комплексах.

Ключевые слова: диатомовый анализ, палеолимнология, палеогеографические реконструкции, позднеледниковье, Самбийский полуостров

Для цитирования: Рудинская А.И., Дружинина О.А., Филиппова К.Г., Лазукова Л.И. Новые данные о позднеледниковых диатомовых комплексах ЮВ Прибалтики по результатам изучения разреза Куликово // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 612-617. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-612

1. Введение

Юго-восточная часть Прибалтики относится к районам, покрытым ледниками в период максимума валдайского оледенения (Mangerud et al., 2004). С началом дегляциации около 20000–19000 кал.л.н. природная среда этого региона претерпела значительные изменения (Veski et al., 2015; Druzhinina et al., 2020). Климатические колебания бёллинг-аллерёдского интерстадиала и похолодание позднего дриаса оказывали значительное влияние на процесс дегляциации.

Наиболее подробно охарактеризованы диатомовые комплексы бёллинг – аллерёда, обнаруженные в отложениях крупных древних озер на территории современной Литвы и в донных отложениях Балтийского ледникового озера. М. Кабайлене была разработана региональная стратиграфическая схема позднеледникового этапа развития этой территории, в которой выделены три диатомовые зоны (Кабайлене, 1968; 2002; Kabailiné, 2006). В

результате исследований двух последних десятилетий на территории Литвы (Gaigalas et al., 2008, Šeirienė et al., 2009; Stančikaitė et al., 2008; 2009; 2015) и изучения новых разрезов на территории Польши и Калининградской области (Witkowski et al., 2009; Druzhinina et al., 2015; 2020; Gałka et al., 2015; Słowinski et al., 2017; Зарецкая и др., 2023) появились новые данные о позднеледниковых диатомовых ассоциациях.

Динамика видового состава диатомовых ассоциаций в отложениях упомянутых внутриматериковых палеоводоемов демонстрирует некоторую асинхронность, что свидетельствует о разном времени и степени отклика водных экосистем на изменение природных условий. Водоемы с небольшой глубиной, в частности, объект настоящего исследования – палеоводоем Куликово, с биотой, чутко реагирующей на кратковременные потепления и похолодания, а также на изменение проточности, глубины и других факторов, потенциально являются источ-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: rudinskaya94@gmail.com (А.И. Рудинская)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



никами более детальной информации об общих и локальных трендах в динамике природной среды.

2. Материалы и методы

Мощность отложений, вскрывающихся в разрезе Куликово, составляет 2 м. Отбор проб проводился с шагом 1-3 см. Для определения абсолютного возраста отложений для всего разреза (192-0 см) получена серия из пяти радиоуглеродных дат. По результатам датирования с использованием программы gbascon 3.1.0. (Blaauw and Christen, 2011). была построена модель роста отложений.

Для реконструкции условий осадконакопления выполнен комплексный литологический анализ – определен гранулометрический состав отложений, рассчитано содержание органического вещества и CaCO_3 , измерена удельная магнитная восприимчивость.

Диатомовый анализ был выполнен для 24 образцов из интервала 142-191 см. Препараты для диатомового анализа приготовлены по стандартной методике (Battarbee et al., 2001). Для последующего расчета концентрации створок в каждый образец была добавлена таблетка ликоподиума Batch 280521 291. Расчет весовой концентрации диатомей производился по формуле (Battarbee et al., 2001).

3. Результаты и их обсуждение

Судя по результатам радиоуглеродного датирования, отложения изученного интервала разреза Куликово накапливались в среднем дриасе и первой половине аллерёда, примерно с 14100 по 13400 кал.л.н. В отложениях среднего дриаса (14100-13900 кал.л.н.) диатомей не представлено – возможно, условия были неподходящими для их вегетации либо сохранения створок.

Судя по видовому составу диатомовых ассоциаций, на этапе 13900–13870 кал.л.н. изучаемый палеоводоем характеризовался небольшой глубиной и средней степенью минерализации, его трофический статус восстановить достаточно сложно из-за преобладания диатомей, индифферентных к трофическому статусу местообитания. Резко преобладающий вид *Pseudostaurosira brevistriata* относится к пионерным и указывает на щелочные условия и воду, богатую кислородом и растворенным кальцием. Это же подтверждается высоким содержанием карбонатов в осадке.

На этапе 1870-1830 кал.л.н. наблюдается крайне незначительное число створок диатомей, не позволяющее выдвигать предположения об условиях изучаемого палеоводоема. Гранулометрический состав отложений не демонстрирует значительных различий со сформированными ранее. Отмечается некоторый рост содержания органического вещества и снижение содержания карбонатов в осадке.

На этапе 13830–13750 кал.л.н. видовой состав диатомовых ассоциаций указывает на условия неглубокого мезотрофно-эвтрофного водоема с низкой минерализацией. Преобладание бентосных

видов, снижение содержание обрастателей и рост содержания створок олигогалобных галофильных видов может указывать на увеличение проточности палеоводоема. С этим предположением согласуются результаты комплексного литологического анализа – отложения характеризуются повышенным содержанием песчаной фракции, высокими значениями медианного размера частиц.

Судя по видовому составу диатомовых ассоциаций, на этапе 13750–13640 кал.л.н. изучаемый палеоводоем характеризовался небольшой и эвтрофными условиями и минерализацией от низкой до средней. На эвтрофикацию водоема может также указывает рост содержания органического вещества в осадке. Преобладающие виды рода *Gyrosigma* spp отличаются крупным размером створок и способны обитать в текучей воде. На возможное увеличение проточности водоема также указывают литологические индикаторы терригенного сноса - рост содержания песчаной фракции в отложениях и увеличение медианного размера частиц и удельной магнитной восприимчивости осадка.

На этапе 13640–13400 кал.л.н. видовой состав диатомовых ассоциаций указывает на условия неглубокого эвтрофного водоема. Резкое преобладание обрастателей *Staurosirella ovata* и *Pseudostaurosira brevistriata* может указывать на спокойные гидродинамические условия, благоприятные для развития характерных для этих видов лентовидных колоний (Зарецкая и др., 2023), и высокое содержание кальция в воде. В донных отложениях отмечается некоторое увеличение содержания карбонатов (до 30%).

Как и в большинстве рассмотренных палеоводоемов с реконструируемой небольшой глубиной, в отложениях изученного интервала разреза Куликово заметна роль мезотрофных и эвтрофных диатомей, в отличие от водоемов с большей глубиной, в которых преобладают олиготрофные виды. Для диатомовых ассоциаций исследуемого разреза, как и для всех рассмотренных палеоархивов, характерно преобладание олигогалобных видов. Это может указывать на низкую минерализацию не только в моренных озерах, но и в других изолированных или полуизолированных бассейнах, расположенных по побережью БЛО.

4. Заключение

Установленные для разреза Куликово значимые изменения видового состава диатомовых ассоциаций в сроки менее чем за столетие указывают на высокую динамичность региональных и локальных природных условий позднеледниковья. В то же время выделенные этапы характеризуются очень небольшой продолжительностью, зачастую сопоставимой с погрешностью радиоуглеродного датирования. Этот факт подтверждает необходимость максимально детального опробования седиментационных архивов для понимания всей сложности процессов, формировавших природную среду в финале плейстоцена. При этом при построении региональных реконструкций необходимо учитывать возможную

асинхронность развития биологических индикаторов в водоемах разной площади, глубины, степени проточности.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00113 «Критические рубежи и палеоклиматические события позднего плейстоцена и голоцена и их роль в формировании природно-культурных ландшафтов юго-восточной Прибалтики».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Зарецкая Н.Е., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Луговой Н.Н., Успенская О.Н., Фролов П.Д. 2023. Природные обстановки позднеледниковья и развитие приледниковых водоемов на северном побережье Самбийского (Калининградского) полуострова. Геоморфология и палеогеография 54 (4): 7-25. DOI: [10.31857/S2949178923040163](https://doi.org/10.31857/S2949178923040163)

Кабайлене М. 1968. Озерные и морские диатомеи в голоцене на территории Литвы. В кн. Ископаемые диатомовые водоросли СССР. М., С.102-107.

Battarbee R.W., Jones V.J., Flower R.J. 2001. Diatoms. In: Smol J.P., Birks H.J-B., Last W.M. (Eds.) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Terrestrial, Algal and Siliceous Indicators*. Boston, pp.155–202.

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3):457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)

Druzhinina O., Kublitskiy Yu., Stančikaitė M. et al. 2020. A new approach based on chironomid, geochemical and isotopic data from Kamyshovoe Lake. *Boreas* 49 (33): 544–561. DOI:[10.1111/bor.12438](https://doi.org/10.1111/bor.12438)

Druzhinina O., Subetto D., Stančikaitė M. et al. 2015. Sediment record from the Kamyshovoe Lake: history of vegetation during late Pleistocene and early Holocene (Kaliningrad District, Russia). *Baltica* 28 (2):121–134.

Gaigalas A., Vaikutienė G., Vainorius J. et al. 2008.

Development of Lake Rėkyva and its environment in Late Pleistocene and Holocene. *Geologija*: 1 (61): 28–36.

Gałka M., Tobolski K., Bubak I. 2015. Late Glacial and Early Holocene lake level fluctuations in NE Poland tracked by macro-fossil, pollen and diatom records. *Quaternary International* 388: 23 – 38. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.03.009](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.03.009)

Kabailinė M. 2006. Late Glacial and Holocene stratigraphy of Lithuania based on pollen and diatom data. *Geologija* 54: 42–48.

Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H. et al. 2004. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of Northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews* 23 (11-12): 1313–1332. DOI:[10.1016/j.quascirev.2003.12.009](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.009)

Šeirienė V., Kabailienė M., Kasperovičienė J. et al. 2009. Reconstruction of postglacial palaeoenvironmental changes in eastern Lithuania: Evidence from lacustrine sediment data. *Quaternary International* 207: 58–68. DOI:[10.1016/j.quaint.2008.12.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.005)

Słowinski M., Zawiska I., Ott F. et al. 2017. Differential proxy responses to late Allerød and early Younger Dryas climatic change recorded in varved sediments of the Trzechowskie palaeolake in Northern Poland. *Quaternary Science Reviews* 158: 94-106. DOI:[10.1016/j.quascirev.2017.01.005](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.01.005)

Stančikaitė M., Kisielienė D., Moeb D. et al. 2009. Lateglacial and early Holocene environmental changes in northeastern Lithuania. *Quaternary International* 207: 80–92. DOI:[10.1016/j.quaint.2008.10.009](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.10.009)

Stančikaitė M., Šeirienė V., Kisielienė D. et al. 2015. Lateglacial and early Holocene environmental dynamics in northern Lithuania: A multi-proxy record from Ginkūnai Lake. *Quaternary International* 357: 44-57. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.08.036](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.036)

Stančikaitė M., Šinkūnas P., Šeirienė V. et al. 2008. Patterns and chronology of the Lateglacial environmental development at Pamerkiiai and Kašučiai, Lithuania. *Quaternary Science Reviews* 27: 127–147 DOI:[10.1016/j.quascirev.2007.01.014](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.01.014)

Veski S., Seppä H., Stančikaitė M. et al. 2015. Quantitative summer and winter temperature reconstructions from pollen and chironomid data between 15 and 8 ka BP in the Baltic-Belarus area. *Quaternary International* 388: 4–11. DOI:[10.1016/j.quaint.2014.10.059](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.059)

Witkowski A., Cedro B., Kierzek A. et al. 2009. Diatoms as a proxy in reconstructing the Holocene environmental changes in the south-western Baltic Sea: the lower Rega River Valley sedimentary record. *Hydrobiologia* 631: 155–172. DOI: [10.1007/s10750-009-9808-7](https://doi.org/10.1007/s10750-009-9808-7)

The use of macrophytes in paleoreconstructions of lakes and seas coastlines dynamics

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Sapelko T.V.^{1*}, Gazizova T.Yu.¹, Rusanov A.G.¹, Lapenkov A.E.¹,
Korneenkova N.Yu.¹, Mazei N.G.², Mazei Yu.A.², Grigoriev V.A.³

¹Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, Sevastyanova Str., 9, St Petersburg, 196105, Russia

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory 1, 119991, Moscow, Russia

³St Petersburg State University, Universitetskaya Emb., 7/9, St Petersburg, 199034, Russia

ABSTRACT. A connection between the dynamics of the distribution of macrophytes in lakes isolated from a large lake or sea with changes in the coastlines of large reservoirs has been established. In the process, there are a change in the composition of macrophytes or their decrease at different stages in the coastlines change of lakes and seas. The conclusions were based on a multi-proxy paleolimnological study of the Lake Ladoga' island lakes and lakes of the Kurgalsky Peninsula on the Gulf of Finland southern coast of the of the Baltic Sea.

Keywords: pollen, aquatic vegetation, age, lakes, Lake Ladoga, Baltic Sea

For citation: Sapelko T.V., Gazizova T.Yu., Rusanov A.G., Lapenkov A.E., Korneenkova N.Yu., Mazei N.G., Mazei Yu.A., Grigoriev V.A. The use of macrophytes in paleoreconstructions of lakes and seas coastlines dynamics // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 618-623. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-618

1. Introduction

Macrophytes are an important component of the lake ecosystems development. However, they are rarely used in paleoreconstructions. Our latest paleolimnological studies of lakes have establish the promise of using pollen and macrofossil of aquatic vegetation to reconstruct the level dynamics of lakes and seas. For the first time, we began methodological research of macrophytes dynamic in the island lakes of Lake Ladoga (Fig. 1). They included pollen, botanical and geobotanical analyzes (Sapelko et al., 2020). All island lakes are located at different absolute altitudes and formed in the second half of the Holocene as a result of isolation from Lake Ladoga (Saarnisto, 2012; Sapelko et al., 2018). Paleolimnological studies on the Putsaari Island (Sapelko and Korneenkova, 2017) showed the need in addition to pollen and botanical analyses geobotanical descriptions. As a result, work using all these methods was continued on the Lunkulansaari' and Valaam' islands lakes, also located in the northern part of Lake Ladoga. The data obtained are used as the basis for new studies of lakes on the Baltic Sea coast in order to study the possibility of using macrophytes to reconstruct the sea coastlines dynamics. For this purpose, lakes Lipovskoye and Belye on the Kurgalsky Peninsula on

the southern coast of the Gulf of Finland (Baltic Sea) were chosen (Fig. 1). The lakes are also located at different absolute elevations above sea level.

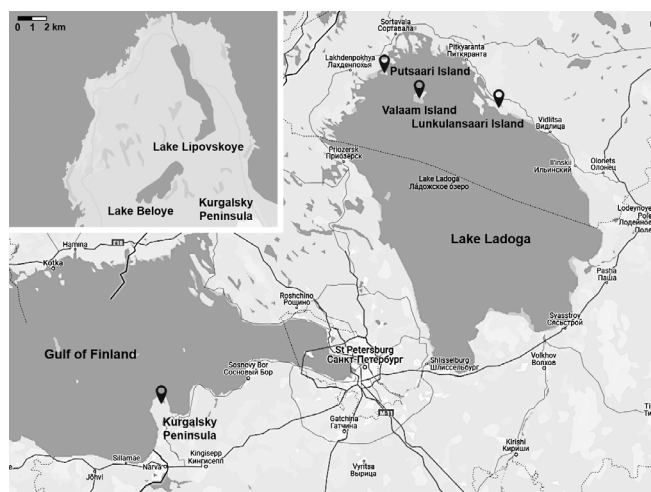


Fig.1. Study area.

*Corresponding author.

E-mail address: tsapelko@mail.ru (T.V. Sapelko)

Received: June 16, 2024; Accepted: July 03, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



2. Materials and methods

Field work on the islands of Lake Ladoga was carried out within topics of the Institute of Limnology, the Russian Academy of Sciences and on the lakes of the Kurgalsky Peninsula - within the framework of the Russian Science Foundation project. Surface samples were taken using a Voronkov sampler, cores with the use a Russian corer (chamber length 1 m, inside diameter 5 cm). The species composition and structure of macrophyte communities were studied from a boat using the generally accepted method of visual mapping (Katanskaya, 1981). Also diving work was done to study modern aquatic vegetation of lakes (Rusanov et al., 2024). Technical treatment of samples for pollen analysis followed a standard method (Grichuk and Zaklinskaya, 1948) with separation by potassium-cadmium heavy liquid. Determination of plant macrofossil was carried out under a microscope with 80x- magnification. During the analysis we were the area occupied by each species was determined as a percentage of the total area of the plant fiber in the field of view of the microscope. To the chronology of events using ^{210}Pb analysis the age and sedimentation rate were obtained for the upper part of the Lake Lipovskoye sediment. The analysis was performed in the laboratory of St. Petersburg State University in St. Petersburg. Concentrations of ^{210}Pb were obtained, determined from the activity of ^{210}Po based on the assumption of the existence of radioactive equilibrium between these isotopes, which is one of the main prerequisites of the non-equilibrium lead-210 method. Radiocarbon dates (AMS) we were obtained for the isolated island lakes stages.

3. Results and discussion

Paleoreconstructions of the shoreline of Lake Ladoga using macrophytes were carried out for the lakes of the islands Putsaari, Lunkulansaari and Valaam, located in the northern part of Ladoga. For the Putsaari lakes macrophytes were determined in cores and surface samples using pollen and macrofossil analysis (Sapelko and Korneenkova, 2017). For Hovatanlampi, Kuikkalampi and Sokkasenlampi lakes on the Lunkulansaari Island obtained data on both the modern spatial distribution of higher aquatic vegetation in the lakes littoral zone and the dynamics of macrophyte pollen and macrofossil over the past 3450 years in lake sediment cores. Radiocarbon dating obtained for the Lunkulansaari island correlated the previously identified pollen zones. The role of macrophytes in paleolimnological reconstructions was also studied for Valaam Island lakes. A description of modern overgrowth was made (Gazizova et al., 2023), the macrophytes dynamics of pollen and macrofossil was determined for Germanovskoye, Zimnyakovskoye, Antonievskoye and Vitalievskoye lakes over the last 4200 years (Saarnisto, 2012). The results obtained using the example of Lake Vitalievskoye were compared with data from other methods (Sapelko et al., 2023b). As is known, pollen of aquatic plants is poorly preserved in lake sediments,

however, the lake sediment of the studied island lakes is sufficiently well saturated with macrophyte pollen for study their dynamics. An added method was the analysis of macrofossil, which were recorded in significant quantities in the cores. With paleolimnological studies the study of modern aquatic vegetation of lakes made it possible to clarify the species definitions of macrophyte pollen and identify the most representative indicators for their use in reconstructing the development of past aquatic vegetation. As a result, establishing the dynamics of macrophytes, elevations of lakes and radiocarbon dating of cores made it possible to reconstruct changes in the shoreline of Lake Ladoga.

As our studies of lakes on the Kurgalsky Peninsula have shown, macrophytes can also be used in paleoreconstructions of the dynamics of sea coastlines. The sediment sequences and surface samples were obtained from both lakes (Sapelko et al., 2023a). The sediments of lakes include macrophyte pollen. According to preliminary results plant macrofossil are extremely rare in the sediments of these lakes. Studies of modern aquatic vegetation on lakes made it possible to establish the depth of distribution of submerged macrophytes: in the Lake Belye it reaches 4 m and in Lake Lipovskoye - 3.5 m The gentle slope of the bottom and high-water transparency contribute to a more dominance of submerged plants in the Lake Belye compared to the Lake Lipovskoye (Rusanov et al., 2024). The pollen spectra of the surface layer of both lakes were studied (Gazizova et al., 2024). Based on the results of a comparison of pollen and geobotanical analysis data the pollen spectra clearly reflect the species composition of submerged hydrophytes of Lake Lipovskoye and floating rooting hydrophytes of both lakes. The composition of helophytes is reflected less clearly. Qualitative diversity indices show an average level of similarity for all macrophytes of both lakes. However, in some cases, pollen of currently widespread macrophytes was not found. In this time Lake Belye is oligotrophic. In modern time the submerged hydrophyte *Lobelia dortmanna* is dominated In Lake Belye, but its pollen was not found in surface samples.

A high content of macrophyte pollen was found in the upper part of the Lake Lipovskoye sediment sequence. Based on the preliminary results of pollen analysis of the upper 15 cm of the core, the first data on changes in plant communities of the past were obtained. Their slight change during the accumulation of this layer of bottom sediments allowed us to draw a preliminary conclusion about the modern age of the studied sediments and their formation in the last subzone of the Subatlantic period (SA-3). Based on this conclusion, samples from the studied sediments were selected for ^{210}Pb dating. The results obtained confirmed the age on the basis of pollen analysis. The top 15 cm of the sediment sequence accumulated over 76.3 ± 6.9 years. The rate of sedimentation over this period of time is estimated to be 1.8 ± 0.2 mm/year. The sediments of the Subatlantic period allowed us to identify three pollen zones corresponding to SA-1, SA-2 and SA-3. Vegetation in this period changing mainly under the influence of human impact. However, in gen-

eral, also climate changes influenced the vegetation. The strongest influence of human impact was in SA-2, when the maximum development of open landscapes associated with logging and fires was reconstructed. The significant content of charcoals in sediments of this period, founded during pollen analysis, confirms this conclusion. This same time, judging by the abundance and composition of macrophyte pollen, is became the period of maximum overgrowth of the lake. The appearance of *Betula nana* together with *Cladium mariscus* and *Caltha palustris* indicates some swamping of the shores. Interestingly, the appearance of *Najas marina* pollen only at the beginning of SA-3, which may indicate a stronger influence of the Baltic Sea from the middle of the 20th century. Human activities with varying degrees of influence are reflected in the vegetation dynamics during the all Subboreal period. New studies of modern macrophyte of the Lake Lipovskoye based on a comparison of the modern macrophytes development and the surface pollen data, showed an incomplete reflection of macrophytes in the pollen spectra. However, in general, the pollen spectra reflect the species composition dynamics and the presence of macrophytes.

4. Conclusion

The results of studies of the Lake Ladoga' island lakes and the coast of the Gulf of Finland of the Baltic Sea made it possible to obtain data on the use of macrophytes for reconstructing the dynamics of the coastlines of lakes and seas in the Holocene. A change in the composition of macrophytes their decrease at different stages in the coastlines change of lakes and seas has been established.

5. Acknowledgments

The study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 23-27-00128 (<https://rscf.ru/project/23-27-00128/>).

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

Gazizova T. Yu., Rusanov A. G., Sapelko T. V. 2023. The similarity assessment of the macrophyte species composition

between modern aquatic vegetation and subrecent pollen spectra of small lakes on the Valaam Island (Lake Ladoga). Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 6: 73–83. doi: [10.17076/lim1703](https://doi.org/10.17076/lim1703)

Gazizova T., Rusanov A., Sapelko T. et al. 2024. Subrecent pollen spectra and modern aquatic vegetation from the Kurgalsky Peninsula lakes, Baltic Sea, Russia. Theses of International Conference XV International Palynological Congress and XI International Organization of Palaeobotany Conference. J. Bek, J. Frojdova (eds.). 27–31 May 2024, Prague, Czech Republic. P. 227 <https://prague2020.cz/wp-content/uploads/2024/05/IPC-IOPC2024-programme-abstracts-r29.pdf>

Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analysis of fossil pollen and spores and its application in paleogeography. Moscow: Geografiz Publ. (In Russian)

Katanskaya V. M. 1981. Higher aquatic vegetation of continental water bodies in the USSR. Methods of study. Leningrad: Nauka; 187 p. (In Russian)

Saarnisto M. 2012. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. Quat. Int. 260: 143–152 [10.1016/j.quaint.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005)

Sapelko T.V., Korneenkova N.Yu. 2017. Reconstruction of the island lakes history according to palynological and botanical analyses. Actual problems of the modern palynology: Proceedings of XIV All-Russian Palynological Conference. Moscow: Geographical faculty of Lomonosov Moscow State University. 311–315 (in Russian)

Sapelko T.V., Terexov A.V., Amantov A.V. 2018. Ladoga Transgression: reconstruction of the final stage and subsequent decline in the northern part of the lake. Regionalnaya geologiya i metallogeniya. 75: 23–34 (in Russian)

Sapelko T., Kuznetsov D., Ludikova A. et al. 2020. The development of island lakes of Lake Ladoga during the Late Pleistocene Holocene. Limnology and Freshwater Biology. 4: 470–471 [10.31951/2658-3518-2020-A-4-470](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-470)

Sapelko T.V., Lapenkov A.E., Gazizova T.Yu. et al. 2023. First results of expeditional work on the lakes of the Kurgalsky Peninsula (southern coast of the Gulf of Finland). Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. Proceedings of the annual conference on the results of expedition research. St.Petersburg. 10: 395-400. DOI: [10.24412/2687-1092-2023-10-395-400](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-395-400)

Sapelko T.V., Gazizova T.Y., Moiseenko A.D. et al. 2023. Lake Vitalievskoye (Valaam Island) isolation process and vegetation dynamics due to changes in the level of the Lake Ladoga during the late Holocene. Geomorfologija i paleogeografiâ. 54 (4): 72-89. doi: [10.31857/S2949178923040126](https://doi.org/10.31857/S2949178923040126)

Rusanov A.G., Gazizova T.Yu., Lapenkov A.E. et al. 2024. Current state of vegetation cover of lakes Beloe and Lipovskoe (Kurgalsky Peninsula). Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS. 2: 51–64. doi: [10.17076/lim1864](https://doi.org/10.17076/lim1864)

Использование макрофитов в палеореконструкциях динамики береговых линий озер и морей

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Сапелко Т.В.¹, Газизова Т.Ю.¹, Русанов А.Г.¹, Лапенков А.Е.¹,
Корнеенкова Н.Ю.¹, Мазей Н.Г.², Мазей Ю.А.², Григорьев В.А.³

¹Институт озераедения РАН, 196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова стр. 9

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва Ленинские горы, д. 1, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

АННОТАЦИЯ. Установлена связь между динамикой распространения макрофитов в озерах, отделяющихся от большого озера или моря, с изменениями береговых линий крупных водоемов. При этом происходит смена состава макрофитов или их сокращение на разных этапах изменения береговых линий озер и морей. Выводы сделаны на основании комплексного палеолимнологического изучения островных озер Ладожского озера и озер Кургальского полуострова на южном побережье Финского залива Балтийского моря.

Ключевые слова: палинология, водная растительность, возраст, озеро, Ладога, Балтика

Для цитирования: Сапелко Т.В., Газизова Т.Ю., Русанов А.Г., Лапенков А.Е., Корнеенкова Н.Ю., Мазей Н.Г., Мазей Ю.А., Григорьев В.А. Использование макрофитов в палеореконструкциях динамики береговых линий озер и морей // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 618-623. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-618](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-618)

1. Введение

Макрофиты являются важным компонентом развития озерных экосистем. Однако в палеореконструкциях их используют редко. Наши последние палеолимнологические исследования озер показали перспективность использования пыльцы и макроостатков высшей водной растительности для реконструкций динамики озер и морей. Впервые методические исследования мы начали проводить на островных озерах Ладожского озера (Рис.1). Они включали в себя палинологический, ботанический и геоботанический анализы (Sapelko et al., 2020). Все островные озера расположены на различных абсолютных высотных отметках и образовались во второй половине голоцена в результате изоляции от Ладожского озера (Saarnisto, 2012; Сапелко и др., 2018). Палеолимнологические исследования на о. Путсаари (Сапелко и Корнеенкова, 2017) показали необходимость, помимо палинологического и ботанического анализов, выполнять и геоботанические описания. В результате, работы, включающие все эти методы, были продолжены на озерах островов Лункулансаари и Валаам, также расположенных в северной части Ладожского озера. Полученные данные взяты за основу новых исследований озер

на побережье Балтийского моря с целью изучения возможности применения макрофитов для реконструкции динамики береговых линий морей. Для этой цели были выбраны озера Липовское и Белое на Кургальском полуострове на южном побережье Финского залива (Рис.1). Озера также расположены на разных абсолютных отметках над уровнем моря.

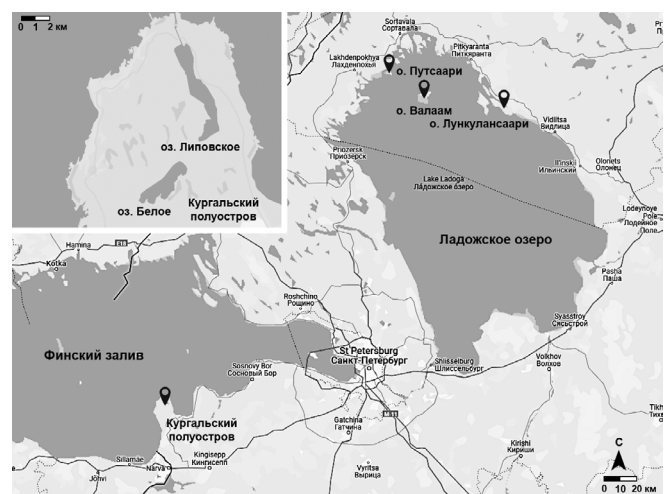


Рис.1. Район исследований.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: tsapelko@mail.ru (Т.В. Сапелко)

Поступила: 16 июня 2024; Принята: 03 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Полевые работы на островах Ладожского озера проводились в рамках экспедиций ИНОЗ РАН, на озерах Кургальского полуострова – в рамках проекта РНФ. Поверхностные пробы отбирались с помощью лота Воронкова, колонки донных отложений отбирались с помощью Русского бура (длиной 1 м и диаметром 5 см). Видовой состав и структура сообществ макрофитов изучались с лодки общепринятым методом глазомерного картирования (Катанская, 1988). Для изучения современной водной растительности озер также выполнялись водолазные работы (Русанов и др., 2024). Пробоподготовка для спорово-пыльцевого анализа осуществлялась по модифицированной стандартной методике (Гричук и Заклинская, 1948) с использованием калий-кадмиевой тяжелой жидкости. Определение растительных макро остатков проводилось под микроскопом с 80-кратным увеличением. При анализе устанавливалась площадь, занимаемая каждым видом, в процентах от общей площади растительного волокна в поле зрения микроскопа.

Для определения хронологии событий с помощью анализа ^{210}Pb получен возраст и скорость осадконакопления для верхней части колонки донных отложений оз. Липовского. Анализ выполнен в лаборатории СПбГУ в г. Санкт-Петербурге. Получены концентрации ^{210}Pb , определенные по активности ^{210}Po на основе допущения о существовании радиоактивного равновесия между этими изотопами, что является одной из основных предпосылок метода неравновесного свинца-210. Для этапов отделения островных озер получены радиоуглеродные (AMS) датировки.

3. Результаты и обсуждение

Палеореконструкции береговой линии Ладожского озера с использованием макрофитов выполнялись для озер островов Путсаари, Лункулансаари и Валаам, расположенных в северной части Ладоги. Для озер о. Путсаари макрофиты определялись в колонках и поверхностных пробах с помощью палинологии и анализа макрофитов (Сапелко и Корнеенкова, 2017). Для озер Ховатанлампи, Куйккалампи и Соккасенлампи на о. Лункулансаари получены данные как современного пространственного распределения высшей водной растительности на литорали озер, так и динамики пыльцы и макроостатков макрофитов за последние 3450 лет по колонкам озерных отложений. Радиоуглеродные датировки, полученные для о. Лункулансаари, подтвердили выделенные ранее палинозоны. Роль макрофитов в палеолимнологических реконструкциях изучалась также для озер о. Валаам. Выполнено описание современного зарастания (Газизова и др., 2023), определена динамика пыльцы и макроостатков макрофитов для озер Германовское, Зимняковское, Антониевское и Витальевское в течение последних

4200 лет (Saarnisto, 2012). Полученные результаты на примере оз. Витальевского сопоставлялись с данными других методов (Сапелко и др., 2023b). Как известно, пыльца водных растений плохо сохраняется в донных отложениях, однако колонки донных отложений изученных островных озер достаточно хорошо насыщены пылью макрофитов для изучения их динамики. Вспомогательным методом при этом стал анализ макроостатков, которые в значительном количестве отмечены в колонках. Одновременное с палеолимнологическими исследованиями изучение современной водной растительности озёр дало возможность уточнить видовые определения пыльцы макрофитов и выявить наиболее репрезентативные показатели для их использования в реконструкции распространения водной растительности прошлого. В результате, установление динамики макрофитов, высотные отметки озер и радиоуглеродные датировки для колонок донных отложений позволили реконструировать изменение береговой линии Ладожского озера.

Как показали наши исследования озер на Кургальском полуострове, макрофиты могут быть использованы и при палеореконструкциях динамики береговых линий морей. Из обоих озер отобраны колонки донных отложений и поверхностные пробы (Сапелко и др., 2023a). Донные отложения озер включают в себя пыльцу макрофитов. По предварительным результатам растительные макроостатки в донных отложениях этих озер встречаются крайне редко. Проведенные на озерах исследования современной высшей водной растительности позволили установить глубину распространения погруженных макрофитов: в оз. Белом она достигает 4 м, а в оз. Липовском - 3,5 м. Пологий уклон дна и высокая прозрачность воды способствуют более выраженному доминированию погруженных растений в оз. Белом по сравнению с оз. Липовским (Русанов и др., 2024). Изучены пыльцевые спектры поверхностного слоя обоих озер (Gazizova et al., 2024). По результатам сопоставления данных пыльцевого и геоботанического анализов в палиносpekтрах хорошо отражен видовой состав погруженных гидрофитов Липовского озера и плавающих укореняющихся гидрофитов обоих озер. Состав гелофитов отражен слабее. Индексы качественного разнообразия показывают средний уровень сходства для всех макрофитов обоих озер. Однако в некоторых случаях пыльца распространенных в настоящее время макрофитов не встречена. Так, в настоящее время в олиготрофном оз. Белом доминирует погруженный гидрофит *Lobelia dortmanna*, однако его пыльца в поверхностных пробах озера не обнаружена.

Высокое содержание пыльцы макрофитов обнаружено в верхней части колонки донных отложений оз. Липовского. По результатам предварительного палинологического анализа верхних 15 см колонки получены первые данные по изменению растительных сообществ прошлого. Их незначительное изменение в период накопления этого слоя донных отложений позволило сделать предварительное заключение о современном возрасте изу-

ченных отложений и о формировании их в последней подзоне субатлантического периода (SA-3). На основании этого заключения образцы из изученных отложений были отобраны для датирования с помощью ^{210}Pb . Полученные результаты подтвердили заключение о возрасте, сделанное на основании палинологического анализа. Верхние 15 см колонки донных отложений накопились за $76,3 \pm 6,9$ лет. Скорость осадконакопления на протяжении этого промежутка времени оценена как $1,8 \pm 0,2$ мм/год. Изученные отложения субатлантического периода позволили выделить три палинозоны, соответствующие SA-1, SA-2 и SA-3. Растительность в данном периоде менялась в основном под влиянием антропогенных факторов. Однако в целом на характер растительности влияли также и изменения климата. Наиболее сильное влияние антропогенных факторов отмечено в SA-2, когда было реконструировано максимальное распространение открытых ландшафтов, связанное с вырубками и пожарами. Значительное содержание микроуглей в отложениях этого периода, обнаруженное при спорово-пыльцевом анализе, подтверждает сделанные выводы. Это же время, судя по обилию и составу пыльцы макрофитов, стало периодом максимально выраженного зарастания озера. Появление *Betula nana* вместе с *Cladium mariscus* и *Caltha palustris* свидетельствует о некотором заболачивании берегов. Интересно появление пыльцы *Najas marina* только в начале SA-3, что может свидетельствовать о более сильном влиянии моря с середины XX века. Деятельность человека с разной степенью влияния отражена в динамике растительности на протяжении всего суббореального периода. Обобщение результатов новых исследований современного зарастания оз. Липовского на основании сопоставления современного распространения макрофитов и результатов спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб показало неполное отражение макрофитов в спорово-пыльцевых спектрах. Однако в целом динамику видового состава и наличие произрастающих макрофитов спорово-пыльцевые спектры отражают.

4. Заключение

Полученные результаты исследований островных озер Ладожского озера и побережья Финского залива Балтийского моря позволили получить данные по использованию макрофитов для реконструкций динамики береговых линий озер и морей в голоцене. Установлена смена состава макрофитов или их сокращение на разных этапах изменения береговых линий озер и морей.

Благодарности

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств гранта Российского научного фонда № 23-27-00128 (<https://rscf.ru/project/23-27-00128/>)

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Газизова Т.Ю., Русанов А.Г., Сапелко Т.В. 2023. Оценка сходства видового состава макрофитов современной водной растительности и субрецентных спорово-пыльцевых спектров малых озер на острове Валаам (Ладожское озеро). Труды КарНЦ РАН. Сер. Лимнология и океанология 6: 73–83. DOI: [10.17076/lim1703](https://doi.org/10.17076/lim1703)
- Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. Москва: Географгиз.
- Катанская В.М. 1988. Высшая водная растительность. Методические аспекты лимнологического мониторинга. Л.: Наука. С. 102–113
- Сапелко Т.В., Корнеевкова Н.Ю. 2017. Реконструкция истории островных озер по данным палинологического и ботанического анализов. Актуальные проблемы современной палинологии. Мат-лы XIV Всерос. палинологической конф. М.: Географический факультет МГУ. С. 311–315.
- Сапелко Т.В., Терехов А.В., Амантов А.В. 2018. Ладожская трансгрессия: реконструкция финальной стадии и последующего спада в северной части озера. Региональная геология и металлогения 75: 23–34.
- Сапелко Т.В., Лапенков А.Е., Газизова Т.Ю. и др. 2023. Первые результаты экспедиционных работ на озерах Кургальского полуострова (южное побережье Финского залива). Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России 10: 395–400. DOI: [10.24412/2687-1092-2023-10-395-400](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-395-400)
- Сапелко Т.В., Газизова Т.Ю., Моисеенко А.Д. и др. 2023. Особенности процесса изоляции озера Витальевского (остров Валаам) и динамика растительности в связи с изменением уровня Ладожского озера в позднем голоцене. Геоморфология и палеогеография 54 (4): 72–89. DOI: [10.31857/10.31857/S2949178923040126](https://doi.org/10.31857/10.31857/S2949178923040126)
- Русанов А. Г., Газизова Т. Ю., Лапенков А. Е., Сапелко Т. В. 2024. Современное состояние растительного покрова озер Белое и Липовское (Кургальский полуостров). Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и океанология 2: 51–64 <http://journals.krc.karelia.ru/index.php/limnology/article/view/1864>
- Gazizova T., Rusanov A., Sapelko T. et al. 2024. Subrecent pollen spectra and modern aquatic vegetation from the Kurgalsky Peninsula lakes, Baltic Sea, Russia. Theses of International Conference XV International Palynological Congress and XI International Organization of Palaeobotany Conference. J. Bek, J. Frojdova (eds.). 27–31 May 2024, Prague, Czech Republic. P. 227 <https://prague2020.cz/wp-content/uploads/2024/05/IPC-IOPC2024-programme-abstracts-r29.pdf>
- Saarnisto M. 2012. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia. Quat. Int 260: 143–152. DOI: [10.1016/j.quaint.2011.09.005](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.09.005)
- Sapelko T., Kuznetsov D., Ludikova A. et al. 2020. The development of island lakes of Lake Ladoga during the Late Pleistocene Holocene. Limnology and Freshwater Biology. 4: 470–471. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-470](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-470)

Sedimentation rate in Lake Plescheevo in the Late Holocene

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYRudinskaya A.I.^{1*}, Konstantinov E.A.¹, Shukhvostov R.S.^{1,2}, Kuzmenkova N.V.^{1,2}¹*Institute of Geography RAS, Staromonetny Lane 29b4, Moscow, 119017, Russia*²*Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991, Russia*

ABSTRACT. Bottom sediments of the Lake Plescheevo is a valuable lake record for the central part of the East European Plain. During this study, we analyzed the lithological characteristics of the upper 4 m of the lake sediment and calculate the sedimentation rate and mass accumulation rate of the lake sediments during last 3500 years. We established that the main part of the increase in the mass accumulation of the Lake Plescheevo bottom sediments is due to the silicate deposits associated with the introduction of terrigenous material into its water area. High values of mass accumulation rates about 3500-3000 cal BP. correspond to a stage of high fluvial activity for the East European Plain. The rapid increase in the rate of mass accumulation rate in the last few decades may be associated with the anthropogenic impact - possibly with the influence of a dam on the Vyoksa River flowing into the lake.

Keywords: Lake Plescheevo, East European Plane, late Holocene, mass accumulation rate, paleoarchives

For citation: Rudinskaya A.I., Konstantinov E.A., Shukhvostov R.S., Kuzmenkova N.V. Sedimentation rate in Lake Plescheevo in the Late Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 624-629. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-624

1. Introduction

Lake sediments is one of the most detailed sources of information about the history of landscapes and climate (Harrison and Digerfeldt, 1993; Cohen et al., 2000; Wohlfarth et al., 2007; Subetto, 2009) having the potential for temporal resolution from a few to tens of years.

Studies of lake sediment cores make it possible to significantly detail the existing ideas about changes in the natural environment and to identify short-period rhythms in the history of sedimentation rates and the factors influencing it. For the central part of the East European Plain, bottom sediments of Lake Plescheevo can be an informative lake record. This lake has existed for 150,000 years (Pisareva et al., 1998), it is located south of the marginal zone of the last glaciation. The lake has a relatively small drainage area and only one river, the Vyoksa, flows out of it. These reasons make the Lake Plescheevo sediments a good basis for paleogeographic reconstructions. Available data on the late Holocene history of the development of the lake (Gapeeva et al., 2005, Palagushkina et al., 2018) do not provide comprehensive information about the rate of sedimentation in the lake, the rhythms of erosion in

the catchment area and the influence of human activity on it. In this study, we analyzed the particle size distribution, geochemical and magnetic indicators of bottom sediments of the Lake Plescheevo and calculate the sedimentation rate for the last 3500 years. We compared these data with existing reconstructions of the Holocene paleohydrological phases for the East European Plain (Panin and Matlakhova, 2015). It helped us to establish whether the identified changes in sedimentation rates in the lake were climatic or anthropogenic.

2. Materials and methods

To obtain the most representative column for paleogeographic reconstructions, we drilled in a deep central part of the lake in a bottom area with low-dynamic sedimentation conditions far from the shores and inflowing rivers. To collect the PLESH-4 column, we collected two overlapped cores (each approximately 1.5 m long) using a Nessler sampler and got the upper part of the unconsolidated bottom sediment using a flap sampler with an empty acrylic pipe. We fixed the extracted pipe, filled with water and bottom sediments, on the ice of the lake using cables and left for 12 hours to freeze (Konstantinov, 2019). As a result, we got the

*Corresponding author.

E-mail address: rudinskaya94@gmail.com (A.I. Rudinskaya)

Received: June 09, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



core of 0.9 m long, transported it to the laboratory, thawed and sampled each 5 cm. The cores, selected using a Nessler sampler, were divided with an interval of 2 cm.

The grain size analysis was performed on a Malvern Mastersizer 3000 laser diffractometer with a Hydro EV receiver. Preliminary sample preparation included the removal of the carbonate component of the sediment with a 10% HCl (reaction in test tubes for one hour), removal of organic matter using 20% H₂O₂ and clay aggregate dispersion with 4% Na₄P₂O₇ and ultrasonic processing within 100 seconds. We calculate loss on ignition (LOI) according to Heiri et al. (2001) at temperatures (105°C, 550°C and 950°C. The content of CaCO₃ is determined as LOI 950 × 2.27 (Dean, 1974). Massive magnetic susceptibility (MS) was measured according to Maher (1998) at a low frequency (500 Hz). Visual analysis of the LOI and magnetic susceptibility curves for different cores made it possible to combine them and obtain a column of bottom sediments with a total length of 4.3 m.

Radiocarbon dating of bottom sediment samples using the liquid scintillation method was carried out at the Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences and at the Laboratory of Nuclear Geophysics and Radioecology of the National Research Center of Lithuania. Radiocarbon dates were calibrated using the OxCal20 algorithm (Reimer et al., 2020).

We studied the content of cesium-137 in the upper part of the sediment (0 - 90 cm of the core). The content of gamma-active radionuclides was determined by an ORTEC GEM-C5060P4-B gamma spectrometer using a semiconductor detector made of ultra-pure germanium (HPGe) with a beryllium window and relative efficiency 20%. The sample exposure time is from 60,000 to 250,000 s, depending on the observed intensity of registration of the desired radionuclides. The analysis was performed at the Department of Radiochemistry, Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University. Next, based on the measurement results in the Spectroline software package, the change in the amount of cesium-137 with depth on the mass and density of the bottom sediment was calculated.

Based on the results of radiocarbon dating and determination of the cesium-137 content, we created an age-depth model using the Bayesian model in the Rbacon software package (Blaauw and Christen, 2011). Then, using the linear rate of sedimentation and sediment density (Zander et al., 2021), we calculated the mass accumulation rate (MAR), organic component accumulation rate (OCAR), carbonates accumulation rate (CAR) and silicate accumulation rate (SAR).

3. Results and discussion

The age of the sediments in the lower part of the column (from the depth of 3.95 m) is 3.5 ka BP. A comparison of the curves of particle size distribution, LOI, MS and sediment density showed that the overlap of

the existing cores corresponds to depths of 0.65-0.90 m from the bottom surface for the upper and middle cores and 1.40-2.25 m for middle and lower core. Thus, the total length of the available bottom sediment column from the PLESH-4 was 3.95 m.

The smallest spread in the median particle size is observed in the depth interval 3.95-2.10 m, it varies from 15.8 to 23.9 μm. There is a maximum scatter of median particle size in the depth interval 2.10-0.85 m – it varies from 9.3 to 24.4 μm. In the depth interval 0.85-0.00 m spread of median particle size decreases, it varies from 12.9 to 17.1 μm. The maximum content of the sand (particle size more than 63 μm) is observed in the range of 3.60-3.10 m (it varies from 5.1 to 17.1%) and 1.45-0.70 m (it varies from 5.2 to 15.7 %). The maximum spread of the clay fraction (less than 4 μm) content varies from 7.7 to 25.2% the depth interval 2.05-0.95 m, in the rest of the column its content varies from 7.3 to 18.6%. The content of organic matter (LOI 550°C) at 3.95-1.5 m varies from 15 to 30%, in the interval of 1.5-0 m it decreases slightly and varies from 15.0 to 22.6%. The content of carbonates varies from 5.0 to 37.9%, the maximum content 26.1-37.9% is observed in the depth from 1.5 to 1.2 m. The silicate part of the bottom sediment varies from 44.9 to 76.6%, its maximum content corresponds to 3.95-3.50 m (54.1-60.8%) and 0.80-0.25 m (64.2-76.6%).

At the depth of 3.95-0.90 m, MS varies from 0.05 to 0.11×10^{-6} m³/kg. At a depth 0.90-0.40 m its values gradually increase from 0.09 to 0.13×10^{-6} m³/kg, in the range of 0.40-0.0 m. The values increase sharply from 0.21 to 0.42×10^{-6} m³/kg. The sediment density in the depth 3.95-1.60 m is 0.17-0.19 g/cm³. It increases to 0.22-0.30 g/cm³ in the depth 1.60-0.80 m and decreases from 0.18 g/cm³ to 0.01 g/cm³ at the depth 0.80-0.00 m.

High MAR values (from 0.037 to 0.054 g/cm² per year) correspond to the depth 3.95-2.8 m. At the depth 2.80-0.80 m MAR varies from 0.010 to 0.027 g/cm² per year. At the depth 0.80-0.25 m MAR significantly decreases to 0.005-0.009 g/cm² per year. There is a noticeable MAR increase up to 0.055 g/cm² per year in the upper 0.25 m. SAR varies from 0.003 to 0.042 g/cm² per year, OCAR varies from 0.001 to 0.012 g/cm² per year, CAR varies from 0.001 to 0.013 g/cm² per year.

The results of laboratory and analytical studies indicate that the main part of MAR of the Lake Plescheevo during the last 3500 years is caused by silicate component of bottom sediments associated with the introduction of terrigenous material into the lake. High MAR in the core depth 3.95-2.8 m (3500-3000 cal BP) correspond to a stage of high fluvial activity for the East European Plain (Panin and Matlakhova, 2015). At the same time, the low MAR observed in the Lake Plescheevo from 900 cal BP to 1950 are not consistent with the high fluvial activity reconstructed for the last millennium. The rapid MAR increase during the last few decades may be associated with anthropogenic impact on the territory, possibly with the influence of a dam on the Vyoksa River flowing into the lake.

4. Conclusion

The results obtained indicate that the features of sedimentation in the Lake Plescheevo are associated with both climatic rhythms and anthropogenic impact, and these patterns require further more detailed study.

Acknowledgements

The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation project 23-77-10063 “Reconstruction of natural events using high-resolution sedimentary paleoarchives of the center of the East European Plain over the last 25 thousand years”

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)
- Cohen A., Palacios-Fest M., Negrini R. et al. 2000. A paleoclimate record for the past 250,000 years from Summer Lake, Oregon, USA: II. Sedimentology, paleontology and geochemistry. *J.Paleolimnol.* 24: 151-182.
- Dean W.E. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *J. Sediment. Petrol.* 44(1): 242–248. DOI: [10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D)
- Gapeeva M.V., Nugraliev D.K., Sigareva L.E., Haides I. 2005. Historical trends of biogenic elements in bottom sediments of Lake Pleshcheevo under natural and anthropogenic conditions. *Jekologicheskaja himija [Ecological Chemistry]*14(4): 55-62. (in Russian)
- Harrison S.P., Digerfeldt G.1993. European lakes as palaeohydrological and palaeoclimatic indicators. *Quaternary Science Reviews* 12(4): 233-248. DOI:[10.1016/0277-3791\(93\)90079-2](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90079-2)
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25: 101–110. DOI: [10.1023/A:10081196114](https://doi.org/10.1023/A:10081196114)
- Konstantinov E.A. 2019. A New Technology of Coring for Bottom Soft Sediments. *Okeanologija [Oceanology]* 59(5): 791–796. DOI: [10.1134/S0001437019050084](https://doi.org/10.1134/S0001437019050084) (in Russian)
- Maher B.A. 1998. Magnetic properties of modern soil-sand Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137 (1–2): 25–54
- Palagushkina O., Frolova L., Zinnatova E., Kosareva L., Nurgaliev D. 2018. Diatoms of sediments of Plescheevo Lake (Russia) as indicators of environmental changes in Holocene. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconferense: 283-288.Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020.The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kB). *Radiocarbon* 62.: 725 - 757. DOI:[10.1017/RDC.2020.4](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.4)
- Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena* 130: 46–61.DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)
- Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020.The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kB). *Radiocarbon* 62: 725 - 757. DOI:[10.1017/RDC.2020.4](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.4)
- Pisareva V.V., Gunova V.S., Shik S.M. 1998. An Ancient Lake Plescheevo. In: *History of the Pleistocene Lakes of the East European Plane*. Saint-Peterburg, pp.291-299. (in Russian)
- Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena* 130: 46–61.DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)
- Subetto D.A. 2009. *Lake Sediments. Paleolimnological Reconstructions*. Saint-Petersburg: Herzen University Publ. (in Russian)
- Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O. et al. 2007. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review. *Quaternary Science Reviews* 26(13): 1871-1883. DOI: [10.1016/j.quascirev.2007.04.005](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.04.005)
- Zander P.D., Żarczyński M., Vogel H., Tylmann W., Wacnik A., Sanchini A., Grosjean M. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of the Total Environment* 755: 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)

Темпы осадконакопления в Плещеевом озере в позднем голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYРудинская А.И.^{1*}, Константинов Е.А.¹, Шухвостов Р.С.^{1,2}, Кузьменкова Н.В.^{1,2}¹Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29с4, Москва, 119017, Россия²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. Донные отложения озера Плещеева служат ценной озерной летописью для центральной части Восточно-Европейской равнины. В ходе настоящего исследования был проанализированы литологические характеристики верхних 4 м донного осадка и рассчитаны темпы осадконакопления для последних 3500 лет. Установлено, что основная часть прироста массы донных отложений озера Плещеева обусловлена силикатной частью донного осадка, что связано с привносом терригенного материала в его акваторию. Высокие значения темпов прироста массы в интервале 3500-3000 кал.л.н. соответствуют этапу высокой флювиальной активности для Восточно-Европейской равнины. Резкий рост темпа прироста массы в последние несколько десятилетий может быть связан с антропогенным воздействием на территорию – возможно, с влиянием плотины на вытекающей из озера р.Вёкса.

Ключевые слова: Плещеево озеро, Восточно-Европейская равнина, поздний голоцен, темпы прироста массы, озерные палеоархивы

Для цитирования: Рудинская А.И., Константинов Е.А., Шухвостов Р.С., Кузьменкова Н.В. Темпы осадконакопления в Плещеевом озере в позднем голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 624-629. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-624

1. Введение

Озерные отложения – один из наиболее подробных источников информации об истории ландшафтов и климата (Harrison and Digerfeldt, 1993; Cohen et al., 2000; Wohlfarth et al., 2007; Субетто, 2009), имеющий потенциал к временному разрешению от первых до десятков лет. Исследования кернов озерных осадков позволяет существенно детализировать имеющиеся представления об изменениях природной среды и выявлять короткопериодную ритмику истории изменения обстановок осадконакопления и факторах, влияющих на эти изменения. Для центральной части Восточно-Европейской равнины информативной озерной летописью могут служить донные отложения озера Плещеева. Возраст этого озера, расположенного южнее краевой зоны последнего оледенения, оценивается в 150 тысяч лет (Писарева и др., 1998); озеро имеет сравнительно небольшую площадь водосбора и из него вытекает только одна река Вёкса, что делает его отложения хорошей основой для палеогеографических реконструкций. Имеющиеся данные о позд-

неголоценовой истории развития озера (Гапеева и др., 2005; Palagushkina et al., 2018) не дают исчерпывающей информации о темпах осадконакопления в акватории, о ритмах эрозии на водосборе и о влиянии хозяйственного освоения на темпы аккумуляции в акватории. В ходе настоящего исследования был проанализирован гранулометрический состав, геохимические и магнитные индикаторы донных отложений озера Плещеева и рассчитаны темпы осадконакопления на последние 3500 лет. Полученные данные были сопоставлены с существующими реконструкциями палеогидрологических фаз голоцена для Восточно-Европейской равнины (Panin and Matlakhova, 2015), что позволило установить, какую природу имеют выявленные изменения темпов осадконакопления в озере – климатическую или антропогенную.

2. Материалы и методы

Для получения наиболее представительной колонки для палеогеографических реконструкций были проведены буровые работы в глубоководной

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: rudinskaya94@gmail.com (А.И. Рудинская)

Поступила: 09 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ложбине в центральной части озера на участке дна со спокойными условиями осадконакопления, удаленном от берегов и впадающих рек. Бурение скважины PLESH-4 проводилось следующим образом: две колонки с перекрытием (длина каждой около 1,5 м) были отобраны при помощи бура Несье, а для отбора верхней части неконсолидированного донного осадка использовался пробоотборник с клапаном и пустая акриловая труба (Константинов, 2019). Извлеченная труба, заполненная водой и донными отложениями, была зафиксирована на льду озера при помощи тросов и оставлена на 12 часов для замораживания полученного керна длиной 0,9 м. Затем керн был транспортирован в лабораторию, разморожен и послойно поделен с шагом 5 см. Колонки, отобранные при помощи бура Несье, были поделены с шагом 2 см.

Гранулометрический анализ отложений проведен на лазерном дифрактометре Malvern Mastersizer 3000 с приемником-диспергатором Hydro EV. Подготовка проб к анализу заключалась в последовательной обработке материала 20% раствором перекиси водорода (для удаления органического вещества), 10 % раствором соляной кислоты (для удаления карбонатов) и 4 % раствором пиррофосфата натрия (для диспергирования глинистых агрегатов) и обработкой ультразвуком в течение 100 с. Потери при прокаливании (ППП) определены согласно методике Heiri et al. (2001) при двух температурных режимах - 550°C и 950°C. Оценка содержания карбоната кальция (CaCO₃) выполнялась путем умножения ППП Δ950 на 2,27 (Dean, 1974). Измерение удельной (массовой) магнитной восприимчивости (МВ) выполнялось на каппаметре ZH Instruments 150L по методике Maher (1998) при частоте 500 Гц. Визуальный анализ кривых ППП и магнитной восприимчивости для разных кернов позволил совместить их и получить колонку донных отложений суммарной длиной 4,3 м.

Радиоуглеродное датирование образцов донных отложений жидкостно-сцинтилляционным методом было проведено в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН и в Лаборатории ядерной геофизики и радиоэкологии Национального исследовательского центра Литвы. Калибровка радиоуглеродных дат выполнена с помощью алгоритма OxCal20 (Reimer et al., 2020).

В верхней части осадка (0 – 90 см керна) было исследовано содержание радионуклидов цезия-137. Определение содержания гамма-активных радионуклидов осуществлялось при помощи гамма-спектрометра ORTEC GEM-C5060P4-B с применением полупроводникового детектора из сверхчистого германия (HPGe) с бериллиевым окном и относительной эффективностью 20%. Время экспозиции проб от 60000 до 250000 с в зависимости от наблюдаемой интенсивности регистрации искоемых радионуклидов. Анализ выполнен на кафедре радиохимии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Далее по результатам измерений в программном пакете Spectroline было рассчитано изменение

количества цезия-137 с глубиной на массу и плотность донного осадка.

По результатам радиоуглеродного датирования и определения содержания цезия-137 в программном комплексе Rbacon (Blaauw and Christen, 2011) по байесовской модели была построена глубинно-возрастная модель. Затем с учетом линейной скорости седиментации и плотности осадка (Zander et al., 2021) были рассчитаны общие темпы прироста массы донного осадка на единицу площади в год (MAR), а также темпы прироста массы органического вещества, карбонатной и силикатной части осадка.

3. Результаты и их обсуждение

Судя по возрасту отложений из нижней части колонки (с глубины 3,95 м), мы располагаем осадочной летописью для последних 3500 лет. Сопоставление кривых изменения гранулометрического состава, потерь при прокаливании, удельной магнитной восприимчивости и плотности осадка показало, что перекрытие имеющихся кернов соответствует глубинам 0,65-0,90 м от поверхности дна для верхнего и среднего керна и 1,40-2,25 м для среднего и нижнего керна. Таким образом, общая длина имеющейся колонки донных отложений из скважины PLESH-4 составила 3,95 м.

В глубинном интервале 3,95-2,10 м наблюдается наименьший разброс значений медианного размера частиц – от до 15,8-23,9 мкм, выше по колонке на глубинах 2,10-0,85 м наблюдается максимальный разброс значений (от 9,3 до 24,4 мкм, интервале 0,85-0 м разброс значений снижается (от 12,9 до 17,1 мкм). Максимальное содержание песчаной фракции (размер частиц более 63 мкм) наблюдается в интервале 3,60-3,10 м (от 5,1 до 17,1%) и 1,45-0,70 м (5,2 до 15,7%). Максимальный разброс значений (от 7,7 до 25,2%) содержания глинистой фракции (менее 4 мкм) характерен для глубинного интервала 2,05-0,95 м в остальной части колонки ее содержание меняется в пределах от 7,3 до 18,6%. Содержание органического вещества (ППП 550°C) на глубинах 3,95-1,5 м меняется в пределах от 15 до 30%, в интервале 1,5-0 м оно немного снижается - до 15,0 - 22,6%. Содержание карбонатных соединений меняется в пределах от 5,0 до 37,9%, максимальное содержание 26,1-37,9% наблюдается в глубинном интервале от 1,5 до 1,2 м. Силикатная часть донного осадка меняется в пределах от 44,9 до 76,6%, ее максимальное содержание характерно для глубинных интервалов 3,95-3,50 м (54,1-60,8%) и 0,80-0,25 м (64,2-76,6%). В глубинном интервале 3,95-0,90 м удельная магнитная восприимчивость меняется в пределах от 0,05 до 0,11*10⁻⁶ м³/кг, в интервале 0,90-0,40 м ее значения постепенно увеличиваются вверх по глубине от 0,09 до 0,13 *10⁻⁶ м³/кг, в интервале 0,40-0,0 м значения резко увеличиваются вверх по глубине – от 0,21 до 0,42 *10⁻⁶ м³/кг. Плотность осадка в глубинном интервале 3,95-1,60 м меняется в пределах 0,17-0,19 г/см³. Выше по керну, в глубинном интервале 1,60-

0,80 м, она увеличивается до 0,22-0,30 г/см³, на глубинах 0,80-0,0 м плотность значительно снижается вверх по колонке – от 0,18 г/см³ до 0,01 г/см³.

Высокие значения общей температуры прироста массы наблюдаются в глубинном интервале 3,95-2,8 м (0,037-0,054 г/см² в год), в интервале 2,8-0,80 значения меняются в пределах 0,010-0,027 г/см² × - год, в интервале 0,80-0,25 температуры прироста массы резко снижаются до 0,005-0,009 г/см² в год, и в верхних 0,25 м колонки наблюдается резкий рост темпов прироста массы – до 0,055 г/см² в год. Темп прироста массы терригенной части осадка менялся в пределах от 0,003 до 0,042 г/см² в год, органического вещества – от 0,001 до 0,012 г/см² в год, карбонатной части осадка – от 0,001 до 0,013 г/см² в год.

Судя по результатам лабораторно-аналитических исследований, основная часть прироста массы донных отложений озера Плесеева в последние 3500 лет обусловлена силикатной частью донного осадка, что связано с привнесением терригенного материала в его акваторию. Высокие значения темпов прироста массы в интервале 3,95-2,8 м (3500-3000 кал.л.н.) соответствуют этапу высокой флювиальной активности для Восточно-Европейской равнины (Panin and Matlakhova, 2015). В то же время низкие темпы прироста массы, наблюдаемые в акватории озера Плесеева в интервале 900-0 кал.л.н., не согласуются с высокой флювиальной активностью, реконструируемой для последнего тысячелетия. Резкий рост темпа прироста массы в последние несколько десятилетий может быть связан с антропогенным воздействием на территорию – возможно, с влиянием плотины на впадающей в озеро р.Вёксе.

4. Заключение

Судя по полученным результатам, особенности осадконакопления в Плесеевом озере связаны как с климатическими ритмами, так и с антропогенным воздействием, и эти закономерности требуют дальнейшего более детального изучения.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 23-77-10063 «Реконструкция природных событий по высокоразрешающим седиментационным палеоархивам центра Восточно-Европейской равнины за последние 25 тысяч лет»

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Гапеева М.В., Нургалиев Д.К., Сигарева Л.Е., Хайдес И. 2005. Исторические тренды биогенных элементов в донных отложениях Плесеева озера в естественных и

антропогенных условиях. *Экологическая химия* 14(4): 55-62.

Константинов Е.А. 2019. Новая технология отбора слабоконсолидированного донного осадка *Океанология* 59(5): 791–796. DOI: [10.1134/S0001437019050084](https://doi.org/10.1134/S0001437019050084)

Писарева В.В., Гунова В.С., Шик С.М. 1998. Древнее озеро Плесеево. В кн. История плейстоценовых озер Восточно-Европейской равнины. СПб., с.291-299.

Субетто Д.А. 2009. Донные отложения озер. Палеолимнологические реконструкции. – СПб: РГПУ.

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6(3):457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)

Cohen A., Palacios-Fest M., Negrini R. et al. 2000. A paleoclimate record for the past 250,000 years from Summer Lake, Oregon, USA: II. Sedimentology, paleontology and geochemistry. *J.Paleolimnol.* 24.: 151-182.

Dean W.E. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *J. Sediment. Petrol.* 44(1): 242–248. DOI: [10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D729D2-2B21-11D7-8648000102C1865D)

Harrison S.P., Digerfeldt G.1993. European lakes as palaeohydrological and palaeoclimatic indicators. *Quaternary Science Reviews.* 12(4): 233-248. DOI:[10.1016/0277-3791\(93\)90079-2](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90079-2)

Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25: 101–110. DOI: [10.1023/A:10081196114](https://doi.org/10.1023/A:10081196114)

Maher B.A. 1998. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137 (1–2): 25–54

Palagushkina O., Frolova L., Zinnatova E., Kosareva L., Nurgaliev D.2018. Diatoms of sediments of Plescheevo Lake (Russia) as indicators of environmental changes in Holocene. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference. 283-288

Panin A., Matlakhova E. 2015. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications. *Catena* 130: 46–61. DOI: [10.1016/j.catena.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.08.016)

Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kB). *Radiocarbon* 62: 725 - 757. DOI:[10.1017/RDC.2020.4](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.4)

Wohlfarth B., Lacourse T., Bennike O. et al. 2007. Climatic and environmental changes in north-western Russia between 15,000 and 8000 cal yr BP: a review. *Quaternary Science Reviews* 26(13): 1871-1883. DOI: [10.1016/j.quascirev.2007.04.005](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.04.005)

Zander P.D., Żarczyński M., Vogel H., Tylmann W. Wacnik A., Sanchini A., Grosjean M. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of the Total Environment* 755: 143713. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143713](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143713)

Fluvioglacial deposits in large lakes and inland seas of the eastern periphery of the Baltic Shield: formation peculiarities, lithological features and place in the palaeogeography of the Late Pleistocene-Holocene in the Northwest European part of Russia



Rybalko A.E.^{1,2,3*}, Subetto D.A.^{3,1}, Tokarev M.Ju.⁴, Repkina T.Yu.^{1,5},
Zaretskaya N.E.^{1,5}, Aksenov A.O.², Belyaev P.Ju.^{1,3}

¹FGBU 'VNIIOkeangeologiya', Angliyskiy pr., 1, Saint-Petersburg, 190121, Russia

²Institute of Earth Sciences SPBSU, 33-35, 10th line V.O. St.Petersburg, 199178, Russia

³Herzen State Pedagogical University of Russia, Emb. River Moika 48, Saint-Petersburg, 191186, Russia

⁴Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 48, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

⁵Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny pereulok, 29, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. In the report, on the basis of studies of the Quaternary cover of the Ladoga and Onega lakes and the White Sea carried out in the last decade, the question of the peculiarities of the formation of the first glacial lakes on the eastern periphery of the Baltic crystalline shield, the time of their deposition, and the peculiarities of sedimentogenesis is discussed. It is concluded that sediments of a specific type of sedimentation, which are formed everywhere in inland basins (seas and lakes) can be identified as a glacial-water formation specific to the glacial regions of the Earth.

Keywords: Ladoga and Onega Lakes, White and Baltic Seas, ice sheet degradation, limno-glacial sediments, glacial-marine sediments, seismoacoustic profiling

For citation: Rybalko A.E., Subetto D.A., Tokarev M.Ju., Repkina T.Yu., Zaretskaya N.E., Aksenov A.O., Belyaev P.Ju. Fluvioglacial deposits in large lakes and inland seas of the eastern periphery of the Baltic Shield: formation peculiarities, lithological features and place in the palaeogeography of the Late Pleistocene-Holocene in the Northwest European part of Russia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 630-635. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-630

1. Introduction

The concept of glacial-water formation of inland basins of the glacial zone was first formulated in 1999 (Rybalko et al., 2017) as a special type of glacial basin sediments, the accumulation of which occurs during direct cyclic melting of the ice sheet, and reflects the first stage of formation of future lakes and inland seas. For more than 20 years, specialised work has been carried out in all the basins considered (Ladoga and Onega Lakes, the Gulf of Finland of the Baltic Sea and the White Sea), which has allowed this concept to be filled with a large amount of factual material. This, in turn, allowed us to get a consistent idea of the development paths of each of the mentioned basins, to consider in detail the conditions of bottom sediment formation,

and to substantiate the differences in the development of these basins in the period from the Late Pleistocene to the present day. This is the focus of the report.

2. Materials and methods

The material for this report was based on work in Lake Onega (2016-2022), Lake Ladoga (2014-2015), the White Sea (2014-2023) and the Gulf of Finland (2001-2015). The work included high-frequency multichannel seismoacoustic profiling (frequencies 4-15 kHz), which allowed us to obtain a picture of the spatial distribution of layered clays directly overlying glacial formations and to dissect their section, as well as geological sampling. Predominantly 300-500 kg, 110 mm diameter

*Corresponding author.

E-mail address: alek-rybalko@yandex.ru (A.E. Rybalko)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** July 02, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



gravity core with plastic liners were used to minimise core disturbance. Processing of the obtained cores by biostratigraphic methods, core tomography and other modern methods of analysis made it possible to obtain petrographic lithological and facies characteristics of bottom sediments and to estimate the age of the main stages of development of water basins of different genesis, which successively occupied negative landforms during glacier retreat (Rybalko et al., 2023; Gromig et al., 2019; Subetto et al., 2020). At the same time, data on marine sections were combined with materials obtained both on the periphery of the lakes and the White Sea (drilling of small lakes) and as a result of geological and geomorphological walking routes.

3. Results and discussion

All modern large lakes and inland seas along the eastern periphery of the Scandinavian glacier occupy large depressions formed as a result of tectonic events in the Late Proterozoic. The shape of the White Sea basin is largely determined by the development of the ancient Kandalaksha rift (Baluev et al., 2012). A similar picture with the inheritance of Riphean structures is observed on Lake Ladoga. And the bizarre shape of the northern part of Onega Bay is largely due to the network of faults of the ancient Proterozoic structure (Palaeolimnology..., 2022). The glacier modified these relief forms during its advance, and they also served as the deepest (and first) parts of the glacial lakes that emerged during ice melting. At present, reliable information on their formation exists for all the basins under consideration, the sediments of which are represented by a stratum of layered clays. The characteristic ribbon type of gradational layering is generally known as varve. At the same time, the clay composition predominates, but can be sandy (proximal clays). At the same time, they almost constantly contain a large number of silty particles, the amount of which varies from section to section, but is more or less constant in one core. The general trend established for both lakes and seas is subsandy bands at the base of the supraglacial section and a gradual thinning of particle size upwards. It occurs in two ways, both by decreasing the number of sandy particles and increasing pelitic particles, and by a general decrease in the thickness of individual pairs of strata. This type of layering is equally characteristic of both glacial lakes and has been recently established in purely marine basins, near the edge of glacial ice shelves. This regularity is especially clear on tomograms of cores, which we have now studied for the entire supraglacial section of Lake Onega and a significant part of the similar section of the White Sea. The character of layering, as well as the mineral composition and geochemistry of heavy elements, which practically inherit those of glacial deposits, testify that the deposits themselves were formed due to gradual deepening of glacial basins and retreat of the glacier margin, and their material composition was formed due to accumulation of glacier melt products and erosion of moraines by intraglacial streams. Separate interruptions in sedimentation and separate sub-packages of layered clays observed in

a number of sections and established by seismoacoustic profiling data reflect the complex life of the glacial basins themselves.

The main changes are observed coincides in the upper horizons of stratified sediments during the change of sedimentation patterns. In Lake Ladoga, the boundary of Holocene and Pleistocene sediments, traceable according to palynological and diatom analyses and paleomagnetic measurements almost exactly with the change of layered sediments to grey monotonous clays of purely lacustrine genesis. In Lake Onega, while the lithological peculiarities of the section are preserved, grey monotonous clays continue to accumulate in the Younger Dryas. In the White Sea, the data of diatom analysis indicate that the upper part of the layered clay section begins to experience the inflow of sea water already from the Allerød period, as evidenced by brackish diatom algae. And in the Onega Bay of the White Sea, biostratigraphic analyses supported by palaeomagnetic data (Rybalko et al., 2017) show how, starting from 14-13 ka BP, a glacial lake appeared in its southern part, which gradually expands to the north. And already in the Allerød time, sea water begins to enter the northern part of this bay, which gradually spreads southwards, resulting in the existence of a sea basin with characteristics similar to those of the present day already in the pre-boreal time. The seismic sections in a number of areas clearly show several localized sub-thicknesses both in the stratified clays and in the transparent marine sediments overlying them. In the Gulf of Finland and Lake Ladoga, the main palaeogeographic event that led to a change in sedimentation patterns is the descent of the lake through the Middle Sweden Straits system, which also occurred at the turn of the Holocene and Late Pleistocene. As a result, a thickness of brownish and bluish clays with characteristic authigenic sulphide mineralisation, in which only freshwater diatoms have been identified, accumulated within the present-day Gulf of Finland during the pre-boreal and boreal periods. Only from the end of the Preboreal and even at the beginning of the Atlantic time, as a result of the Littorina transgression and penetration of Atlantic waters into the Baltic Sea depression, a marine regime close to the modern one is established here, in many respects resembling a brackish-water basin. In contrast, in Lake Ladoga, a lake basin with its own transgressive-regressive levels has existed since the pre-boreal time.

4. Conclusions

The above data convincingly demonstrate that at the turn of the Late Pleistocene-Holocene, basin sediments were formed in all large lakes and inland marine basins along the eastern periphery of the Baltic Crystalline Shield, which at the first stage were formed in purely freshwater conditions due to the inflow of glacial meltwater. These basins were characterized by high turbidity and poor development of fauna and flora, low organic matter content and cyclic nature of sedimentation. The cyclicity was multi-ordered and was determined both by fluctuations in the level of the glacial

basins and by the peculiarities of melting of the glacier itself, which gradually retreated towards Fennoscandia as these basins developed. At the end of the Younger Dryas (and sometimes already in the Allerød), events related to the penetration of sea water, the descent of glacial lakes, and the development of organic life both in the basins themselves and on their shores occurred everywhere in these basins. This led both to changes in the textural features of sediments and to a jump in the content of biogenic elements in bottom sediments, accompanied in some cases by the appearance of authigenic sulphides. After that, the fate of the glacial basins changed and half of them followed the marine path and half stopped at the stage of lakes. Since this geohistorical event at the turn of the Late Pleistocene-Holocene corresponded to the accumulation of a characteristic sediment column with its own structural-textural, mineral and geochemical characteristics, it allows us to distinguish this stage of sedimentation into a specific glacial-water formation, the formation of which preceded the formation of extensive periglacial areas.

Acknowledgements

This work was financially supported by RSF grant N 22-17-00081.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest requiring disclosure in this article.

References

- Baluev A.S., Zhuravlev V.A., Terekhov E.N. 2012. Tectonics of the White Sea and adjacent territories. pp. 104. (in Russian)
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. 2019. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments. *Boreas* Vol. 48: 330-348. DOI: [10.1111/bor.12379](https://doi.org/10.1111/bor.12379)
- Palaeolimnology of Lake Onega: from a glacial lake to modern conditions. 2022. Petrozavodsk, pp. 332. (in Russ.)
- Rybalko A.E., Zhuravlev V.A., Semenova L.R. et al. 2017. Quaternary sediments of the White Sea and the development history of the modern White Sea basin in the late Pleistocene-Holocene. *White Sea System*. Vol. IV. Moscow. 16-84. (in Russian)
- Rybalko A.E., Subetto D.A., Belkina N.A. et al. 2023. Formation of the largest lakes in the North-Eastern Europe at the eastern periphery of the Baltic Crystalline Shield. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54(4): 40–56. DOI: [10.31857/S2949178923040102](https://doi.org/10.31857/S2949178923040102) (in Russian)
- Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. 2020. Structure of Late Pleistocene and Holocene sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia). *Minerals*, Vol. 10 (11): 964. DOI: [10.3390/min10110964](https://doi.org/10.3390/min10110964)

Отложения ледниково-водной формации в крупных озерах и внутренних морях восточной периферии Балтийского щита: особенности формирования, литологические особенности и место в палеогеографии позднего неоплейстоцена-голоцена на Северо-западе Европейской части России



Рыбалко А.Е.^{1,2,3*}, Субетто Д.А.^{1,3}, Токарев М.Ю.⁴, Репкина Т.Ю.^{1,5}, Зарецкая Н.Е.^{1,5}, Аксёнов А.О.², Беляев П.Ю.^{1,3}

¹ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Английский пр., д.1, 190121, Санкт-Петербург, Россия,

²Институт наук о Земле СПбГУ, д.33-35, ул. 10-я линия В.О., 199178, Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, д.48, набережная реки Мойки, 191186, Санкт-Петербург, Россия

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, д.1, Ленинские горы, 119991, Москва, Россия

⁵Институт географии РАН, дом 29, стр. 4. Старомонетный переулок, 119017, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. В докладе на основе проведенных в последнее десятилетие исследований четвертичного покрова Ладожского и Онежского озер и Белого моря обсуждается вопрос об особенностях формирования первых ледниковых озер по восточной периферии Балтийского кристаллического щита, времени их заложения, особенностей седиментогенеза. Делается вывод, что отложения специфического типа осадконакопления, которые формируются повсеместно в внутренних бассейнах (морях и озерах) могут быть выделены как специфическая для гляциальных областей Земли ледниково-водная формация

Ключевые слова: Ладожское и Онежское озера, Белое и Балтийское моря, деградация ледниковых щитов, ледниково-озерные осадки, ледниково-морские осадки, сейсмоакустическое профилирование

Для цитирования: Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Токарев М.Ю., Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Аксёнов А.О., Беляев П.Ю. Отложения ледниково-водной формации в крупных озерах и внутренних морях восточной периферии Балтийского щита: особенности формирования, литологические особенности и место в палеогеографии позднего неоплейстоцена-голоцена на Северо-западе Европейской части России // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. - № 4. - С. 630-635. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-630

1. Введение

Представления о ледниково-водной формации внутренних бассейнов гляциальной зоны были впервые сформулированы в 1999 г. (Рыбалко и др., 2017), как об особом типе отложений приледниковых бассейнов, накопление которых происходило при непосредственном циклическом таянии ледникового щита, и отражает первый этап формирования будущих озер и внутренних морей. В течение более чем 20 лет, во всех рассматриваемых бассейнах (Ладожском и Онежском озерах, Финском

заливе Балтийского моря и Белом море), проводились специализированные работы, которые позволили наполнить это понятие большим фактическим материалом. Это позволило, в свою очередь, получить последовательное представление о путях развития каждого из упомянутых бассейнов, подробно рассмотреть условия формирования донных осадков, а также обосновать различия в развитии этих бассейнов в период с позднего неоплейстоцена по настоящее время. Именно этому и посвящен доклад.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: alek-rybalko@yandex.ru (А.Е. Рыбалко)

Поступила: 05 июня 2024; **Принята:** 02 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Материалом для настоящего сообщения послужили работы в Онежском озере (2016-2022 гг.), в Ладожском озере (2014-2015 гг.), в Белом море (2014-2023 гг.) и в Финском заливе Балтийского моря (2001-2015 гг.). Работы включали высокочастотное многоканальное сейсмоакустическое профилирование (частоты 4-15 кГц), позволившее получить картину пространственного распространения слоистых глин, непосредственно перекрывающих ледниковые образования, и расчленить их разрез, а также геологический пробобор. Использовались преимущественно грунтовые прямоточные трубки весом 300-500 кг, диаметром 110 мм с пластиковыми вкладышами, что позволило минимизировать нарушения керна. Обработка полученных кернов биостратиграфическими методами, томография кернов и другие современные методы анализа позволили получить петрографическую литолого-фациальную характеристику донных осадков и оценить возраст основных этапов развития различных по генезису водных бассейнов, последовательно занимающих при отступании ледника отрицательные формы рельефа (Рыбалко и др., 2023; Gromig et al., 2019; Subetto et al., 2020). Одновременно данные по морским разрезам совмещались с материалами, полученными как по периферии озер и Белого моря (бурение малых озер), так и в результате пеших геолого-геоморфологических маршрутов.

3. Результаты и обсуждение

Все современные крупные озера и внутренние моря по восточной периферии Скандинавского ледника занимают крупные депрессии, сформировавшиеся в результате тектонических событий в позднем протерозое. Форма котловины Белого моря во многом обусловлена развитием древнего Кандалакшского рифта (Балуев и др., 2012). Близкая картина с наследованием рифейских структур наблюдается и на Ладожском озере. А причудливая форма северной части Онежского залива во многом обусловлена сетью разломов древней протерозойской структуры (Палеолимнология..., 2022). Ледник модифицировал при наступлении эти формы рельефа, они же и послужили наиболее глубоководными (и первыми) частями приледниковых озер, возникших при таянии льда. В настоящее время достоверные сведения об их формировании существуют для всех рассматриваемых бассейнов, отложения которых представлены толщей слоистых глин. Характерный ленточный тип градационной слоистости получил общее шведское название варвы (varved clays). При этом преобладает глинистый состав, но может быть и песчанистым (проксимальные отложения). В тоже время в них практически постоянно присутствует большое количество частиц алевритовой размерности, количество которых меняется от разреза к разрезу, но более-менее постоянно в одном керне. Общая тенденция, уста-

новленная для обоих озер и морей – это субпесчаные ленты в основании надледникового разреза и постепенное утонение размерности частиц вверх по нему. Оно происходит двумя путями, как за счет снижения количества песчаных частиц и увеличения пелитовых, так и путем общего снижения мощности отдельных пар слоев. Такой вид слоистости в равной мере характерен как для приледниковых озер, так и установлен в последнее время в сугубо морских бассейнах, у края шельфовых ледников. Особенно четко эта закономерность проявлена на томограммах кернов, которые в настоящее время изучены нами для всего надледникового разреза Онежского озера (Палеолимнология Онежского озера..., 2022) и значительной части аналогичного разреза Белого моря. Характер слоистости, а также минеральный состав и геохимия тяжелых элементов, которые практически наследуют таковые от ледниковых отложений, свидетельствуют, что сами отложения формируются за счет постепенного углубления приледниковых бассейнов и отодвигания края ледника, а их вещественный состав возник за счет аккумуляции продуктов таяния ледника и размыва морен интрагляциальными потоками. Намечающиеся в ряде разрезов донных отложений и устанавливаемые по данным сейсмоакустического профилирования отдельные перерывы в осадконакоплении и отдельные субпачки слоистых глин отражают сложную жизнь самих приледниковых бассейнов.

Основные изменения намечаются в верхних горизонтах толщ слоистых осадков при смене характера осадконакопления. В Ладожском озере граница голоценовых и неоплейстоценовых отложений, прослеживаемая по данным палинологического и диатомового анализов и палеомагнитных измерений, практически точно совпадает со сменой слоистых отложений серыми монотонными глинами уже чисто озерного генезиса. В Онежском озере при сохранении литологических особенностей разреза серые монотонные глины продолжают накапливаться еще в позднем дриасе. В Белом море данные диатомового анализа свидетельствуют, что верхняя часть разреза слоистых глин уже с аллередского времени испытывает подток морских вод, свидетельством чему являются солоноватые диатомовые водоросли. В Онежском заливе Белого моря по данным биостратиграфических анализов, подкрепленных палеомагнитными данными (Рыбалко и др., 2017) показано, как начиная с 14-13 тыс. кал. л.н. в южной его части возникает приледниковое озеро, которое постепенно расширяется к северу. В аллередское время в северную часть Онежского залива Белого моря начинают поступать морские воды, которые постепенно распространяются и в южном направлении, в результате чего уже в пребореальное время здесь существует морской бассейн с близкими для современного времени характеристиками. При этом на сейсмических разрезах в ряде районов отчетливо выделяются несколько локальных субтолщ, как в толще слоистых глин, так и в прозрачных морских отложениях, их пере-

крявающих. В Финском заливе Балтийского моря и в Ладожском озере основным палеогеографическим событием, приведшим к смене характера осадконакопления, является спуск Балтийского ледникового озера через систему среднешведских проливов, которая также случилась на рубеже голоцена и позднего неоплейстоцена (11,6 тыс.кал.л.н.). В результате в пределах современного Финского залива в пребореальное и бореальное время накапливалась толща буроватых и голубоватых глин с характерной аутигенной сульфидной минерализацией, в которой установлены только пресноводные диатомеи. И только с конца пребореала и даже в начале атлантического времени в результате литориновой трансгрессии и проникновения атлантических вод во впадину Балтийского моря здесь устанавливается близкий к современным условиям морской режим, во многом напоминающий солоновато-морской бассейн. В Ладожском озере начиная с пребореального времени существует озерный бассейн со своими трансгрессивно-регрессивными уровнями.

4. Заключение

Приведенные выше данные убедительно свидетельствуют, что на рубеже позднего неоплейстоцена – голоцена во всех крупных озерах и внутренних морских бассейнах по восточной периферии Балтийского кристаллического щита сформировалась толща бассейновых осадков, которая на первом этапе формировалась в чисто пресноводных условиях за счет поступления талых ледниковых вод. Эти бассейны характеризовались большой мутностью и слабым развитием фауны и флоры, низким содержанием органического вещества и циклическим характером осадконакопления. Цикличность была многопорядковой и определялась как колебаниями уровня приледниковых бассейнов, так и особенностями таяния самого ледника, который по мере развития этих бассейнов постепенно отступал в сторону Фенноскандии. В конце позднего дриаса (а иногда уже в аллереде) в этих бассейнах повсеместно произошли события, связанные с проникновением морских вод, спуском приледниковых озер, а также развитием органической жизни как в самих бассейнах, так и на их берегах. Это привело как к изменению текстурных особенностей осадков, так и к скачкообразному повышению содержания биогенных элементов в донных осадках, сопрово-

ждаемому в ряде случаев появлением аутигенных сульфидов. После этого судьба приледниковых бассейнов изменилась и половина из них пошла по морскому пути, а половина остановилась на стадии озер. Так как этому геосторическому событию на рубеже позднего неоплейстоцена – голоцена соответствовало накопление характерной толщи осадков со своими структурно-текстурными, минеральными и геохимическими характеристиками, то это позволяет выделить этот этап осадконакопления в специфическую ледниково-водную формацию, формирование которой предшествовало образованию обширных перигляциальных областей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00081.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

- Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н. 2012. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий. Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. 2022. В: Субетто Д.А. (ред.), ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», Российский научный фонд. — Петрозаводск: КарНЦ РАН.
- Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р. и др. 2017. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене–голоцене. Система Белого моря. Т. IV. Москва. 16–84.
- Рыбалко А.Е., Субетто Д.А., Белкина Н.А. и др. 2023. Формирование крупнейших озер северо-запада России по восточной периферии Балтийского кристаллического щита. Геоморфология и палеогеография 54(4): 40–56. DOI: [10.31857/S2949178923040102](https://doi.org/10.31857/S2949178923040102)
- Gromig R., Wagner B., Wennrich V. et al. 2019. Deglaciation history of Lake Ladoga (northwestern Russia) based on varved sediments. *Boreas* Vol. 48: 330-348. DOI: [10.1111/bor.12379](https://doi.org/10.1111/bor.12379)
- Subetto D., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. 2020. Structure of Late Pleistocene and Holocene sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia). *Minerals*, Vol. 10 (11): 964. DOI: [10.3390/min10110964](https://doi.org/10.3390/min10110964)

The mid- and Late Holocene history of forest fires in Central Evenkia inferred from macrocharcoal analysis



Shatunov A.E.^{1*}, Kupriyanov D.A.¹, Prokushkin A.S.², Mazei N.G.³, Novenko E.Yu.¹

¹Department of Quaternary Paleogeography, Institute of Geography Russian Academy of Science, Staromonetny Lane, 29, Moscow, 119017, Russia

²V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center SB RAS", Akademgorodok 50/28, 660036, Krasnoyarsk, Russia

³Department of Physical Geography and Landscape Science, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leniskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. The paper presents the reconstruction of the Mid- and Late Holocene frequency of forest fires in the Lower Tunguska River basin in the vicinity of the settlement of Tura (central Evenkia) revealed from plant macro remains and macroscopic charcoal analysis of peat cores from two peatlands. The results of analysis showed similar patterns of charcoal accumulation rates in peat deposits from both bogs during the Holocene and their significant temporal variability. According to the data obtained, the stages of increased frequency and intensity of fires in Central Evenkiya occurred during the periods 7800-6500 cal years BP and 3800-2900 cal years BP and were influenced by climatic factors. The period of increasing fire activity, which has been observed from the first half of the XVII century to the present day, was caused by a combination of anthropogenic and natural factors. A decline in the charcoal accumulation rate in peatlands and an increase in the length of fire return intervals were characteristic for periods 6500-3800 cal years BP and 2900-600 cal years BP. Perhaps the cooling climate created unfavorable conditions for the occurrence and spread of forest fires.

Keywords: peatlands, fire frequency, plant macro remains of peat, northern taiga, Central Siberia

For citation: Shatunov A.E., Kupriyanov D.A., Mazei N.G., Prokushkin A.S., Novenko E.Yu. The mid- and Late Holocene history of forest fires in Central Evenkia inferred from macrocharcoal analysis // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 636-641. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-636

1. Introduction

Fires are an important part of forest ecosystem functioning and development. The reconstruction of fire events in the past and the identification of their associated causes will obviously contribute to the prediction of their likely dynamics in the changing climate, that determine the importance and relevance of the present study. The frequency of forest fires in Central Evenkia has been studied by the dendrochronological method only for the period of XV-XXI centuries (Kharuk et al., 2005), while the Holocene fire history has remained unexplored.

2. Materials and methods

Reconstructions of the frequency of forest and peat fires were carried out based on the data obtained

from of two peatlands located in Central Evenkia on the Syverma plateau, at the confluence of the Kochechum with the Lower Tunguska Rivers in the vicinity of the settlement of Tura. The study area is located within the basalt plateaus dissected by river valleys. The vegetation cover is dominated by larch forests at various stages of post-fire succession. The region belongs to the area of continuous permafrost.

The sample plots were located within two peatlands: the Gornoye peatland (64°13'55.97"N, 100°02'5.21"E, H = 335 m a.s.l. (above sea level)), occupied a flat plateau in 10 km to the South from the settlement of Tura, and the Lower Tunguska peatland (hereafter LT, 64°10'49.74"N, 100°34'59.16"E, H = 220 m a.s.l.), situated on the 2nd floodplain terrace of the Lower Tunguska Rivers in 20 km to the South-east from the settlement. The peatlands under study are

*Corresponding author.

E-mail address: toxavilli@yandex.ru (A.E. Shatunov)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 03, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



located approximately 30 kilometers apart, on opposite banks of the Lower Tunguska River. The depths of the revealed peat cores were 215 cm for the Gornoye peatland and 113 cm for the LT peatland.

AMS radiocarbon dating of 6 peat samples and plant residuals from the Gornoye peatland and 4 samples from the LT peatland was performed at the the Common Use Center “Radiocarbon Dating and Electron Microscopy Laboratory” of the Institute of Geography RAS.

The sample preparation for the macroscopic charcoal (size > 125 μm) analysis was carried out according to a standard procedure (Mooney and Tinner, 2011). The CharAnalysis software package (Higuera, 2009) was used to specify the dynamics of forest fires, to determine the charcoal accumulation rate (pieces $\text{cm}^{-2} \text{yr}^{-1}$, CHAR) in peat and to identify local fire episodes. The chronological basis of the reconstruction was an age-depth model, were constrained using the Bayesian-based algorithm Bacon version 2.3.9.1 (Blaauw and Christen, 2011) in the R language environment.

LOWESS (local weighted regression) was used as a smoothing method to calculate the background and threshold rates of charcoal accumulation in the peat of the studied bogs and identify local fire episodes. The period for which data was interpolated for the Gornoye peatland was 35 years. Due to the sedimentation gap in the peat deposit of the LT peatland, the analysis was divided into two parts. The period of data interpolation for the older part of the peat core was 54 years and 17 years for the younger one. The time window for determining the local fire episodes was 2500, 1200 and 300 years respectively.

The fire return interval (FRI) was identified as the time period between fire episodes.

The analysis of plant macro-remains in peat was carried out using standard methods for the study of the botanical composition of peat (GOST 28245-09) following (Katz et al., 1977).

3. Results and discussion

Peat initiation in the Gornoye peatland occurred at 7830 ± 50 cal year BP, the rate of the vertical peat growth varied from 0.15 to 0.58 mm/years. No significant breaks in peat formation were identified. The age of the basal layer of the peat column obtained from the LT peatland was 7630 ± 45 cal. years BP. For the studied part of the peat sequences, four radiocarbon dates with one inversion were obtained. Besides, there is an obvious hiatus in these deposits at a depth of 56 cm. At this depth, the type of peat changes dramatically from grass-feathermoss (*Equisetum* sp. 30 %, *Menyanthes trifoliata* 30%, green mosses 15%) to sphagnum peat. At a depth of 56-43 cm, peat is formed mainly by *Sphagnum balticum* (70%), and starting from a depth of 40 cm *S. lindbergii* (65%) dominated. The radiocarbon date 5660 ± 60 cal years BP was obtained for a sample from the depth of 79-80 cm, and the age of the sample from the depth 55-54 cm was 830 ± 40 cal. years BP. The accumulation of 25 cm of peat over almost 3,000 years is inconsistent with its composition and low degree of decomposition. We suggest that the interruption in sedimentation was associated with permafrost uplift and loss of some of the material during the development of the perennial frost mound and its subsequent degradation.

Due to the hiatus in peat accumulation, charcoal accumulation rate analyses for the LT peat core were carried out separately for the lower and upper parts of the core. The lower part (Fig. 1 A) covered the time period from 7500 to 4500 cal. years BP, the upper part belongs to the period from 850 cal years Bp to the present (Fig. 1 B). In total 11 fire event were identified. For the Gornoye peatland (Fig. 1C), 20 fire episodes were detected for the whole time of peataccumulation, starting at about 7830 cal. years BP.

The results of analysis showed similar patterns of charcoal accumulation rates in peat deposits from both bogs during the Holocene and their significant tempo-

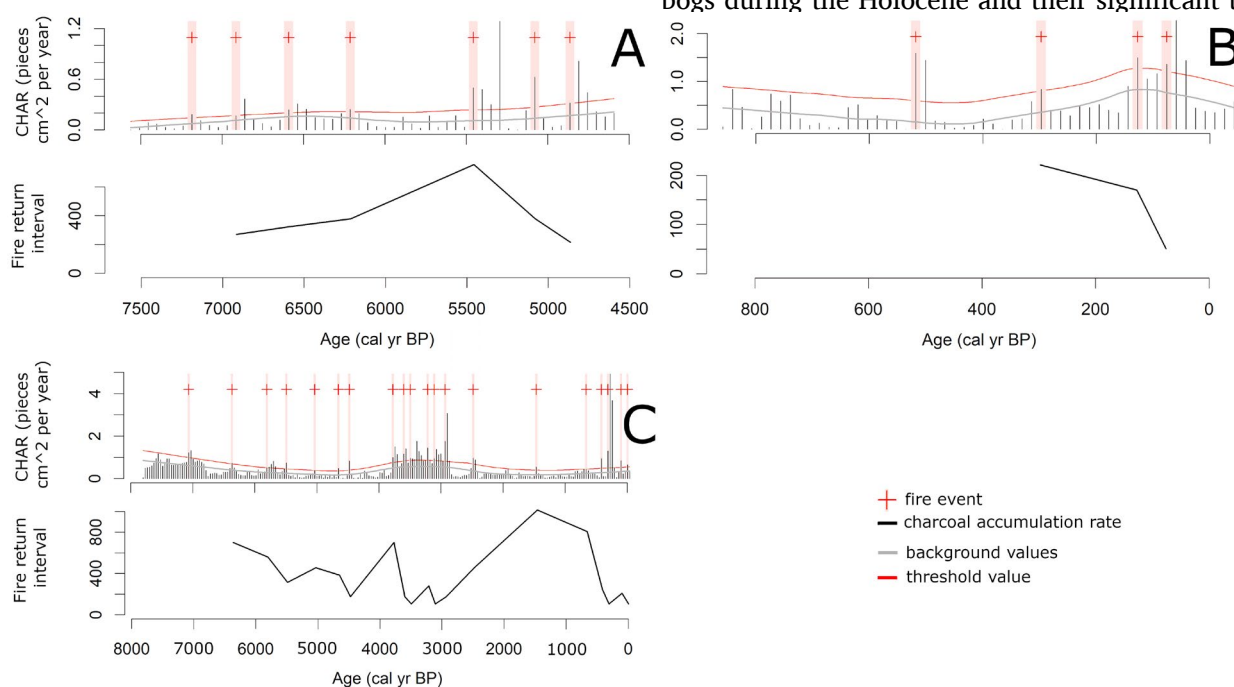


Fig.1. Charcoal accumulation rate in the Nizhnyaya Tunguska (A, B) and Gornoye (C) bogs. CHAR - rate of charcoal accumulation.

ral variability. The relatively high charcoal accumulation rate and a series of fire episodes were revealed in the Middle Holocene between 7800 and 6500 cal. years BP. The low charcoal accumulation was characteristic for the time intervals 6500-3800 and 2900-600 cal. years BP with an average FRI of 400 years. In some periods, for example between 6500 and 5500 cal. years BP, the FRI lasted 500 years or more. No fire events were detected between 4500 and 3800 cal. years BP. According to available vegetation and climate reconstructions for northern Siberia (Andreev et al., 2004; Groisman and Gutman, 2012), the climate was colder and wetter in the periods 5700-3500 and 2700-2000 cal. years BP than today. Perhaps the cooling climate created unfavorable conditions for the occurrence and spread of forest fires. In the period 3800-2900 cal. years BP, climate warming and a decrease in humidification may have caused a rise in the background values of the charcoal accumulation rate and an increase in the number of fires. After 600 cal. years BP, the accumulation of macroscopic charcoal particles in both peatlands was markedly accelerated. The increase in the frequency of fires at that time was probably due to the development of the territory by Russian colonizers from the XVII century onwards (Gaidin and Burmakina, 2022). The FRI was about 100 years in the period from the XVII to XX centuries, and since the XX century it lasted lower than 50 years. The results of a study of fires using the dendrochronological method (Kharuk et al., 2005) showed the similar duration of the FRI for the study area during the same time.

4. Conclusions

During the Middle and Late Holocene, there were phases of increase in the frequency and intensity of fires in Central Evenkia in the periods 7800-6500 and 3800-2900 cal. years BP, due to the influence of the climatic factors as temperature and moisture variability, and a period of increase in fire activity since the beginning of the XVII century, caused by the combined action of anthropogenic and natural factors. A decline

in the rate of charcoal accumulation and an extension of the FRI occurred during the time intervals 6500-3800 and 2900-600 cal years BP.

Acknowledgements

The studies were supported by grant of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (agreement № 075-15-2024-554 of 24.04.2024).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A. et al. 2004. Vegetation and climatic changes around Lama Lake, Tymyr Peninsula, Russia during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International* 122: 69–84. DOI: [10.1016/j.quaint.2004.01.032](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.032)
- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible palaeoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis* 6: 457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)
- Gaidin S.T., Burmakina G.A. 2022. Development of waterways of the northern part of the Yenisei basin in the XVII - early XX century. *Historical Courier* 3: 87–103. (in Russian)
- GOST 28245-09. 1990. Peat. Methods of determination of botanical composition and degree of decomposition. M. (in Russian)
- Groisman P.Y., Gutman G. 2012. Regional environmental change in Siberia and its global implications. Springer Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-007-4569-8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8)
- Higuera P. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sedimentary coal analysis.
- Katz N.Y., Katz S.V., Skobeeva E.I. 1977. Atlas of plant remains in peats. Moscow: Nedra. (in Russian)
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Ranson K.J. 2005. Spatial and temporal structure of fires in north taiga larch forests of Central Siberia. *Russian Ecological Journal* 36(5): 302–311.
- Mooney S.D., Tinner W. 2011. Analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Bogs and Peat* 09: 1–18.

История лесных пожаров в Центральной Эвенкии в среднем и позднем голоцене по данным анализа макроскопических частиц угля в торфе

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYШатунов А.Е.^{1*}, Куприянов Д.А.¹, Прокушкин А.С.²,
Мазей Н.Г.³, Новенко Е.Ю.¹¹ Институт географии РАН, Старомонетный 29, 119017, Москва, Россия² ФИЦ КНЦ СО РАН, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Академгородок 50/28, 660036, Красноярск, Россия³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские Горы 1, 119991, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрена периодичность лесных пожаров в среднем и позднем голоцене в бассейне Нижней Тунгуски в окрестностях посёлка Тура (центральная Эвенкия). Реконструкция выполнена по данным анализов концентрации макроскопически частиц угля и ботанического состава торфа в торфяных залежах двух болот. Результаты анализа показали близкие закономерности изменения скоростей накопления макрочастиц угля в голоцене в торфяных залежах обоих болот и значительную их вариабельность во времени. Согласно полученным данным, этапы увеличения частоты и интенсивности пожаров в Центральной Эвенкии выявлены в периоды 7800-6500 кал.л.н и 3800 - 2900 кал. л.н, и были обусловлены действием климатического фактора. Период возрастания пожарной активности, установленный, начиная с первой половины XVII века до настоящего времени, был вызван совместным действием антропогенного и природных факторов. Снижение скоростей аккумуляции макроскопических частиц угля в торфяных залежах болот и возрастание длительности межпожарных интервалов было характерно для периодов 6500-3800 и 2900-600 кал. л.н. Возможно, в условиях похолодания климата создавались неблагоприятные условия для возникновения и распространения лесных пожаров.

Ключевые слова: торфяные болота, периодичность пожаров, ботанический состав торфа, северная тайга, Средняя Сибирь

Для цитирования: Шатунов А.Е., Куприянов Д.А., Мазей Н.Г., Прокушкин А.С., Новенко Е.Ю. История лесных пожаров в Центральной Эвенкии в среднем и позднем голоцене по данным анализа макроскопических частиц угля в торфе // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 636-641. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-636

1. Введение

Пожары – важная составляющая функционирования и развития лесных экосистем. Реконструкция пожарных событий в прошлом и выявление причин, с которыми они были связаны, очевидно, поможет спрогнозировать их вероятную динамику в условиях меняющегося климата текущего столетия, что определяет актуальность данного исследования. На территории центральной Эвенкии изучение частоты лесных пожаров проводилось только для временного интервала XV-XXI веков методами дендрохронологии (Kharuk et al., 2005).

2. Материалы и методы

Реконструкции периодичности лесных и торфяных пожаров выполнены по материалам изучения двух болот, расположенных в Центральной Эвенкии в окрестностях пос. Тура. Изучаемая территория расположена в пределах базальтовых плато, расчленённых речными долинами. В растительном покрове преобладают лиственные леса, находящиеся на различной стадии послепожарной сукцессии. Регион принадлежит к области сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

Исследования проведены для торфяных залежей двух болот: Горное (64°13'55.97"N,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: toxavilli@yandex.ru (А.Е. Шатунов)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 03 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



100°02'5.21"E, $H_{\text{аос}} = 335$ м), расположенного на плато в 10 км к юго-западу от пос. Тура, и болота Нижняя Тунгуска (далее НТ, 64°10'49.74"N, 100°34'59.16"E, $H_{\text{аос}} = 220$ м), приуроченного к 2 надпойменной террасе реки Нижняя Тунгуска в 20 км к юго-востоку от поселка. Изучаемые болота находятся на расстоянии примерно 30 км друг от друга, на разных берегах реки Нижняя Тунгуска. Глубина отобранных торфяных колонок составляла 215 см для болота Горное и 113 см для болота НТ. Определение абсолютного возраста образцов торфа выполнено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» ИГ РАН.

Подготовка проб для анализа макрочастиц угля (> 125µ) была проведена по стандартной методике (Mooney and Tinner, 2011). Для установления специфики динамики лесных пожаров, определяемой фоновыми скоростями накопления частиц угля в торфе и выявления локальных пожарных событий, использовался программный пакет CharAnalysis (Higuera, 2009). Хронологической основой реконструкции выступает модель вертикальной скорости роста отложений, построенная по радиоуглеродным датировкам в программной среде R с помощью библиотеки Bacon версии 2.3.9.1. (Blaauw and Christen, 2011). При расчете фоновых и пороговых скоростей накопления частиц угля в торфе изученных болот и выявления локальных пожарных эпизодов применялась LOWESS (локальная взвешенная регрессия) как метод сглаживания. Период, по которому происходила интерполяция данных, для болот Горное составил 35 лет. Из-за перерыва в накоплении торфяной залежи болота НТ, анализ был разделен на две части. Для более древней части отложений болота НТ, период, по которому происходила интерполяция данных составил 54 года и для более молодой – 17 лет. Временное окно для определения локальных пожарных эпизодов составляло 2500, 1200 и 300 лет соответственно.

Межпожарный интервал рассчитан, как интервал времени между пожарными эпизодами.

Ботанический анализ торфа для разрезов обоих болот выполнен по стандартной методике (ГОСТ 28245-09) с использованием определителя (Кац и др., 1977).

3. Результаты и их обсуждение

Торфяная залежь болота Горное начала формироваться 7830 ± 50 кал. л.н. (калиброванных лет назад). Скорость торфонакопления изменялась от 0.15 до 0.58 мм/год. Существенных перерывов в формировании торфяной залежи выявлено не было. Возраст подошвы торфяной колонки, мощностью 113 см, извлеченной из болота НТ составляет 7630 ± 45 кал. л.н. Для рассматриваемой части залежи получено 4 радиоуглеродные датировки с одной инверсией. И, кроме того, в этих отложениях присутствует очевидный хиатус на глубине 56 см. На этой глубине резко меняется тип торфа с травяно-зеленомошного (*Equisetum* sp. 30 %, *Menyanthes trifoliata* 30%, зеленые мхи 15%) на сфагновый. На глубине 56-43 см торф образован преимущественно *Sphagnum balticum* (70 %), а начиная с глубины 40 см *S. lindbergii* (65 %). Для образца с глубины 79-80 получена датировка 5660 ± 60 кал.л.н., а с глубины 55-54 см - 830 ± 40 кал. л.н. Накопление 25 см торфа в течение почти 3000 лет противоречит его составу и низкой степени разложения. Мы предполагаем, что перерыв в осадконакоплении был связан с мерзлотным пучением и потерей части материала в процессе развития бугра и его последующей деградации. Из-за хиатуса были построены две реконструкции пожаров для болота НТ. Первая (Рис. 1А) охватывает временной интервал от 7500 до 4500 кал.л.н., а вторая охватывает период от 850 кал. л.н. по настоящее время (Рис. 1В). В целом

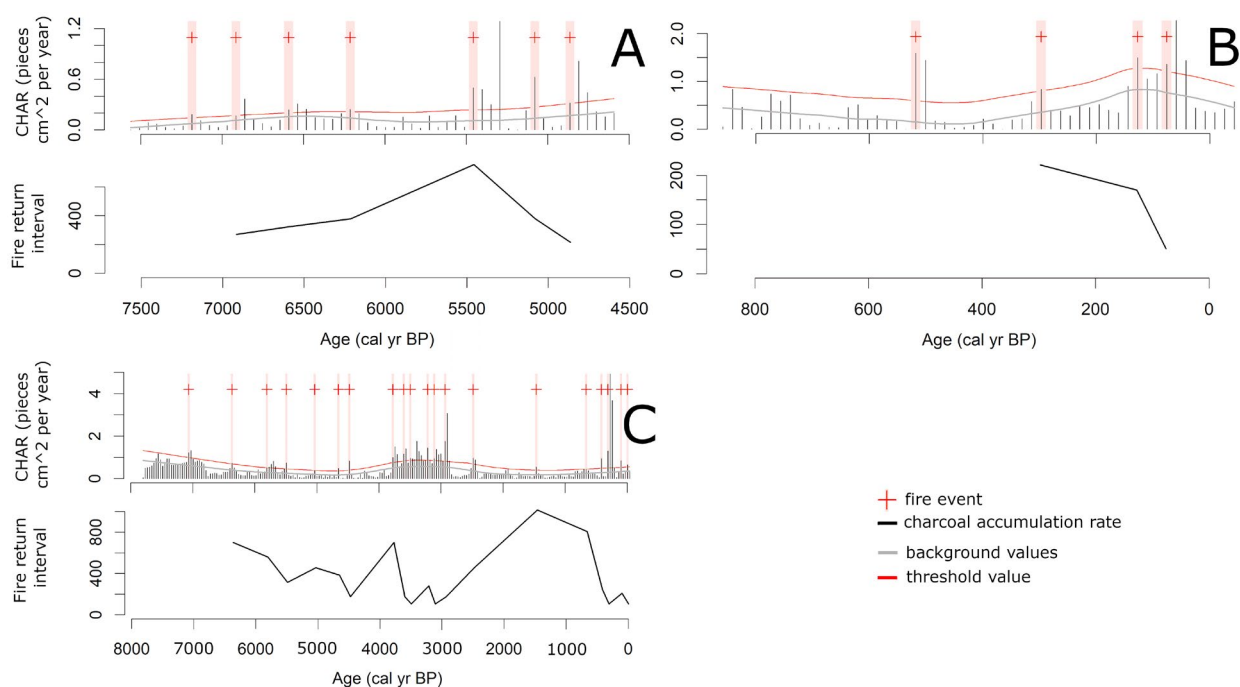


Рис.1. Скорость аккумуляции угля в болотах Нижняя Тунгуска (А, В) и Горное (С). CHAR – скорость аккумуляции угля.

для болота Нижняя Тунгуска реконструировано 11 пожаров. Для болота Горное (Рис. 1С) для периода формирования торфяной залежи, начиная около 8000 кал.л.н, выявлено 20 пожаров.

Результаты изучения концентраций макро-скопических частиц угля в болотах Горное и НТ показали близкие закономерности изменения скоростей накопления макрочастиц угля в голоцене и значительную их вариабельность во времени. Относительно высокие скорости аккумуляции макрочастиц угля и серия пожарных эпизодов выявлена в среднем голоцене между 7800 и 6500 кал. л.н. Низкие скорости были характерны для периодов 6500-3800 и 2900-600 кал. л.н., средний межпожарный интервал (МПИ) в это время составлял около 400 лет, а в отдельные периоды, например, между 6500 и 5500 кал.л.н. МПИ продолжался около 500 лет и более. В интервале с 4500 до 3800 кал. л.н. пожарные события отсутствовали. Согласно имеющимся реконструкциям растительности и климата для севера Сибири (Andreev et al., 2004; Groisman and Gutman, 2012) в периоды 5700-3500 и 2700-2000 кал. л.н. климат был более холодным и влажным, чем в настоящее время. Возможно, в условиях похолодания климата создавались неблагоприятные условия для возникновения и распространения лесных пожаров. Увеличение фоновых значений скорости аккумуляции угольных частиц и рост числа пожаров в период 3800 - 2900 кал. л.н., возможно, был связан с потеплением климата и сокращением увлажнения. После 600 кал. л.н. аккумуляция макрочастиц угля в торфяных залежах обоих болот и частота пожаров увеличилась. Вероятно, усиление частоты пожаров в это время связано с освоением территории русскими колонизаторами, начиная с XVII века (Гайдин и Бурмакина, 2022). МПИ имеют длительность около 100 лет в период с XVII века по XX век, а начиная с XX века он длился менее 50 лет. Близкую продолжительность МПИ для изучаемой территории в этот период выявлена по результатам исследования пожаров с помощью дендрохронологического метода (Kharuk et al., 2005).

4. Заключение

На протяжении среднего и позднего голоцена выявлены этапы увеличения частоты и интенсив-

ности пожаров в Центральной Эвенкии в периоды 7800-6500 и 3800 - 2900 кал. л.н., обусловленных действием климатического фактора и период возрастания пожарной активности с начала XVII века, вызванной совместным действием антропогенного и природных факторов. Снижение скоростей аккумуляции частиц угля и возрастание длительности МПИ было характерно для периодов 6500-3800 и 2900-600 кал. л.н.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Гайдин С. Т., Бурмакина Г. А. 2022. Освоение водных путей северной части бассейна Енисея в XVII - начале XX века. Исторический курьер 3: 87–103.
- ГОСТ 28245-09. 1990. Торф. Методы определения ботанического состава и степени разложения. М.
- Кац Н.Я., Кац С.В., Скобеева Е.И. 1977. Атлас растительных остатков в торфах. М., Недра.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Klimanov V.A. et al. 2004. Vegetation and climate changes around the Lama Lake, Tumor Peninsula, Russia during the late Pleistocene and Holocene. Quaternary International 122: 69–84. DOI: [10.1016/j.quaint.2004.01.032](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2004.01.032)
- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. Bayesian Analysis 6: 457–474. DOI: [10.1214/ba/1339616472](https://doi.org/10.1214/ba/1339616472)
- Groisman P. Y., Gutman G. 2012. Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences. Springer Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-007-4569-8](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8)
- Higuera P. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis.
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Ranson K.J. 2005. The spatiotemporal pattern of fires in northern taiga larch forests of Central Siberia. Russian Journal of Ecology 36(5): 302–311.
- Mooney S.D., Tinner W. 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. Mires and Peat 09: 1–18.

Late Glacial vegetation changes in the Kostroma Volga region based on pollen study of Lake Chukhlomskoye bottom sediments

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Samus A.V., Konstantinov E.A., Filippova K.G.

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny L., 29/4, Moscow, 119017, Russia

ABSTRACT. The article presents the results of a palynological study of Lake Chukhlomskoye bottom sediments. Pollen analysis in combination with the results from ^{14}C and ^{137}Cs dating made it possible to reconstruct the main stages of changes in plant communities in the Kostroma Volga region at the end of the Pleniglacial and during the Late Glacial: 19.5–16.9 cal. ka BP – periglacial steppe, 16.9–14.7 cal. ka BP – birch periglacial forest-steppe, 14.7–12.7 cal. ka BP – spruce and birch-spruce forests and open woods with periglacial-steppe and meadow communities, 12.7–11.7 cal. ka BP – birch periglacial forest-steppe with rare participation of spruce.

Keywords: reconstruction of paleolandscapes, lacustrine sediments, pollen analysis, Final Pleniglacial, Late Glacial

For citation: Samus A.V., Konstantinov E.A., Filippova K.G. Late Glacial vegetation changes in the Kostroma Volga region based on pollen study of Lake Chukhlomskoye bottom sediments // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 642-647. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-642

1. Introduction

Lake Chukhlomskoye is located on the Galich-Chukhloma Upland in the northern part of the Kostroma region. It has a small catchment area (~270 km²) and no large tributaries. The lake was not affected by the last (Late Valdai) glaciation (Map of Quaternary..., 1972). Because of this, the sediments of the lake provide a reliable basis for regional paleolandscape reconstructions of the Late Pleistocene. However, until recently, palynological studies of the Lake Chukhlomskoye bottom sediments were not conducted.

Paleobotanical studies of sediments in the Lake Chukhlomskoye area were carried out in the last century by K.K. Markov, G.A. Blagoveshchensky, and V.P. Grichuk. Thus, K.K. Markov (1940) published the results of pollen, diatom, and carpological analyses of the Mikulino Interglacial peat and gyttja layers found near the Semenkovo village and on the Ivanovsky stream (Chukhloma and Ivanovsky Ruche sections, respectively). In 1953, V.P. Grichuk re-examined deposits from the Chukhloma section and obtained a more complete pollen diagram of the Mikulino Interglacial (Grichuk, 1989).

In the Kostroma Volga region, palynological studies of Lake Galichskoye bottom sediments were also conducted (Velichko et al., 2001). The studies of

sediment sequences from two cores made it possible to reconstruct the vegetation and climate changes over the past 55 thousand years.

This article is devoted to the results of pollen analysis of the Lake Chukhlomskoye bottom sediments, which accumulated during the Final Pleniglacial and Late Glacial, and to the reconstruction of vegetation in the area surrounding the lake.

2. Materials and methods

The main object of this study is the Chu13A core, 7.45 m long, which was collected with a Livingstone piston sampler in a 4 m deep hollow at the bottom of Lake Chukhlomskoye. Pollen analysis was carried out for 29 samples from depths of 3.4–0.6 m at 10 cm intervals. Laboratory sample preparation included treatment with 10% HCl, boiling in 10% KOH solution, heavy liquid separation (Grichuk and Zaklinskaya, 1948), and acetolysis (Mazei and Novenko, 2021). Samples were examined under the microscope with 400x magnification. Percentages of all taxa were calculated from the total pollen of terrestrial plants (arboreal pollen + non-arboreal pollen). The pollen diagram was constructed with the Tilia/TiliaGraph software (Grimm, 1990) and zoned using cluster analysis in the CONISS program.

*Corresponding author.

E-mail address: alina.samus.msu@gmail.com (A.V. Samus)

Received: June 04, 2024; **Accepted:** July 03, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Eight accelerator mass spectrometry (AMS) radiocarbon dates and one date from ^{137}Cs measurements were obtained (Filippova et al., 2023). A depth-age model based on these dates was built using the rbacon package.

3. Results

Chu13A core includes the following layers: 0–0.50 m – weakly consolidated organic silt; 0.5–1.45 m – organomineral silt; 1.45–1.63 m – carbonate silt; 1.63–2.5 m – organomineral silt with a sandy silt layer at a depth of 1.95–2.15 m; 2.50–2.85 m – sandy mineral silt; below 2.85 m – mineral silt.

On the pollen diagram, six Local Pollen Zones (LPZs) were identified.

LPZ 1 (3.4–2.55 m) is characterized by the highest Non-Arboreal Pollen (NAP) contents (57–72%), including high values of Poaceae (14–24%), *Artemisia* (10–19%), Chenopodiaceae (3–8%), and forbs; simultaneous presence of pollen of tundra plants (*Betula* sect. *Nanae*, *Alnaster*, Saxifragaceae), steppe and meadow plants (*Bupleurum*, *Valeriana*, etc.), xerophytes (*Ephedra*, *Helianthemum*), and halophytes (Plumbaginaceae). The Arboreal Pollen (AP) group contains pollen of spruce (*Picea*), Scots and Siberian pines (*Pinus sylvestris*, *P. sibirica*), tree and shrub birches (*Betula* sect. *Albae*, *B.* sect. *Fruticosae*, *B.* sect. *Nanae*), willow (*Salix*), larch (*Larix*), and a typical heliophyte – sea buckthorn (*Hippophae*). Rare pollen grains of broad-leaved species are found. In **LPZ 2** (2.55–2.25 m), the content of AP gradually increases (51–62%) due to pollen of birches and willows, but the values of NAP (38–49%), *Artemisia* (14–16%), Chenopodiaceae (9–10%), and forbs remain high. Pollen of periglacial plants (*Thalictrum*, *Helianthemum*, Saxifragaceae) is present. **LPZ 3** (2.25–1.93 m) is dominated by spruce pollen (13–40%). Pollen of *Betula* sect. *Albae* (17–25%), *Artemisia* (11–27%), Chenopodiaceae (8–9%) is abundant. AP values constitute 53–67% of spectra. **LPZ 4** (1.93–1.73 m) is characterized by similar contents of NAP (50–52%) and AP (48–50%), an abundance of birch pollen, including dwarf birch (up to 2%), and *Artemisia* (25–26%). In the pollen assemblages of **LPZ 5** (1.73–1.53 m), AP values increase (64–82%), and *Betula* sect. *Albae* (36–64%) predominates. *Artemisia* and Chenopodiaceae decline. **LPZ 6** (1.53–0.6 m) is distinguished by a great amount of AP (90–96%), including birch, spruce, and alder (*Alnus*) pollen. Pollen of oak (*Quercus*), elm (*Ulmus*), linden (*Tilia*), and hazel (*Corylus*) is constantly present.

4. Discussion and conclusions

A palynological study of the Chu13A sediment sequence at depths of 3.4–0.5 m, along with an analysis of the depth-age model, made it possible to reconstruct the main stages of environmental change in the Kostroma Volga region during the Final Pleniglacial and Late Glacial, starting from 19.5 cal. ka BP.

It was established that at the end of the Pleniglacial (19.5–16.9 cal. ka BP, LPZ 1) the vegetation cover was

dominated by periglacial steppe with rare participation of cold-resistant trees and shrubs (larch, dwarf birch, shrub alder). The combination of desert-steppe, boreal and tundra elements observed in the pollen spectra of LPZ 1 is quite typical for Pleistocene periglacial floras. The presence of pollen from heliophytes (*Hippophae*, *Helianthemum*), xerophytes (*Bupleurum*, *Ephedra*) and halophytes (Plumbaginaceae) in this interval indicates a wide distribution of open vegetation in a cold continental climate. Spruce could grow only in protected habitats, which is also confirmed by pollen data on Lake Galichskoye bottom sediments (Velichko et al., 2001). Finds of pollen from thermophilous species (oak, elm, linden, hazel) can probably be explained by its redeposition from interglacial sediments and transfer to the lake due to erosion processes in conditions of sparse vegetation.

During the Oldest Dryas (16.9–14.7 cal. ka BP; LPZ 2), birch began to spread in the study area, forming small forests and open woods. Treeless areas were occupied by periglacial-steppe associations. In herbaceous vegetation, the role of grasses and the diversity of forbs decreased, but xerophytes and plants of tundra and meadow communities were still combined in the grass cover. Shrub birch and willow communities took a considerable part in the vegetation. During the Bølling-Allerød interstadial (14.7–12.7 cal. ka BP, LPZ 3), spruce and birch-spruce forests and sparse woods, as well as periglacial-steppe and meadow associations, were widespread. The participation of spruce in the forests was more significant in the early part of the interstadial (Bølling), since the pollen of *Picea* shows higher values in the lower part of LPZ 3. The role of spruce in the vegetation cover declined during the Allerød. The Younger Dryas landscapes (12.7–11.7 cal. ka BP, LPL 4) were represented by birch periglacial forest-steppe with rare participation of spruce; open spaces were occupied by xerophytic and grass-forb communities.

The beginning of the Holocene (11.7–10.7 cal. ka BP, LPZ 5) was marked by the gradual replacement of periglacial forest-steppes by birch forests with spruce and pine. In the interval of 10.7–5.5 cal. ka BP, a break in sedimentation is recorded in the sediment sequence. The vegetation cover of the Subboreal period of the Holocene (LPZ 6) was dominated by spruce-birch forests with pine and broadleaf species (oak, elm, linden, ash). The undergrowth was formed by hazel and viburnum.

Acknowledgements

The work was funded by the Russian Science Foundation project No. 23-77-10063, “Reconstruction of natural events based on high-resolution sedimentation paleoarchives from the center of the East European Plain over the past 25 thousand years.”

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Filippova K.G., Konstantinov E.A., Kuzmenkova N.V. et al. 2023. Structure and origin of the bottom relief of Lake Chukhlomskoe (Kostroma Region). *Geomorfologiya i paleogeografiya* [Geomorphology and paleogeography] 54(4): 145–162. (in Russian) DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047)

Grichuk V.P., Zaklinskaya E.D. 1948. Analiz iskopayemykh pyl'tsy i spor i yego primeneniye v paleogeografii [Analysis of fossil pollen and spores and its application in palaeogeography]. Moscow: OGIZ. (in Russian)

Grichuk V.P. 1989. Istoriya flory i rastitel'nosti Russkoy ravniny v pleystotsene [History of flora and vegetation of the Russian Plain in the Pleistocene]. Moscow: Nauka. (in Russian)

Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. INQUA, Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter 4: 5–7.

Map of Quaternary deposits: O-38-VII. 1972. In: Borozdina Z.I. (Ed.), Geological map of the USSR. Map of

Quaternary deposits. Mezenskaya series. Scale: 1:200 000. Moscow: Vsesoyuzny Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR. (in Russian)

Markov K.K. 1940. Materials for the stratigraphy of Quaternary sediments of the Upper Volga basin. In: *Trudy Verkhnevolzhskoi ekspeditsii*, vyp. 1. [Proceedings of the Upper Volga Expedition of the USSR Academy of Sciences, vol. 1]. Leningrad: GE NII LGU. (in Russian)

Mazei N.G., Novenko E.Yu. 2021. The use of propionic anhydride in the preparation of samples for pollen analysis. *Nature Conservation Research. Zapovednaya Nauka* [Nature Conservation Research. Reserved nature] 6(3): 110-112. (in Russian) DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Velichko A.A., Kremenetski K.V., Negendank J. et al. 2001. Late Quaternary history of vegetation of the Kostroma Volga region according to palynological studies of Lake Galichskoye bottom sediments. *Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda* [Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period] 64: 5–21. (in Russian)

Изменения растительности в Костромском Заволжье в позднеледниковье по данным палинологического изучения донных отложений Чухломского озера

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Самусь А.В., Константинов Е.А., Филиппова К.Г.

Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29/4, Москва, 119017, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты палинологического исследования донных отложений Чухломского озера. Анализ палинологических данных в совокупности с данными датирования отложений по ^{14}C и ^{137}Cs позволили реконструировать этапы изменения растительных сообществ в Костромском Заволжье в конце плейстоцена и в позднеледниковье: 19.5–16.9 тыс. кал. л.н. – перигляциальная степь, 16.9–14.7 тыс. кал. л.н. – березовая перигляциальная лесостепь, 14.7–12.7 тыс. кал. л.н. – еловые и березово-еловые леса и редколесья с перигляциально-степными и луговыми сообществами, 12.7–11.7 тыс. кал. л.н. – березовая перигляциальная лесостепь с небольшим участием ели.

Ключевые слова: реконструкция палеоландшафтов, озерные отложения, спорово-пыльцевой анализ, финальный плейстоцен, позднеледниковье

Для цитирования: Самусь А.В., Константинов Е.А., Филиппова К.Г. Изменения растительности в Костромском Заволжье в позднеледниковье по данным палинологического изучения донных отложений Чухломского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 642-647. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-642](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-642)

1. Введение

Чухломское озеро расположено на Галичско-Чухломской возвышенности в северной части Костромской области. Оно имеет небольшую площадь водосбора (~270 км²), крупные притоки отсутствуют. Озеро не было затронуто последним (поздневалдайским) оледенением (Карта четвертичных..., 1972), благодаря чему его отложения могут служить основой для надежных региональных палеоландшафтных реконструкций позднего плейстоцена. Тем не менее, до недавнего времени палинологические исследования донных осадков Чухломского озера не проводились.

Палеоботаническое изучение отложений в районе исследования проводилось в прошлом столетии К.К. Марковым, Г.А. Благовещенским, В.П. Гричуком. Так, в трудах К.К. Маркова (1940) приведены результаты палинологического, диатомового и карпологического изучения микулинских торфов и гиттий у д. Семеново и на ручье Ивановском

(разрезы «Чухлома» и «Ивановский ручей», соответственно). Позже, в 1953 г., В.П. Гричук повторно выполнил пыльцевой анализ отложений разреза «Чухлома», ему удалось получить более полную пыльцевую диаграмму микулинского межледниковья (Гричук, 1989).

В Костромском Заволжье также было выполнено палинологическое исследование донных отложений Галичского озера (Величко и др., 2001). Исследование отложений двух опорных колонок позволило установить последовательность изменений растительности и климата за последние 55 тысяч лет.

Настоящая статья посвящена результатам спорово-пыльцевого анализа донных отложений Чухломского озера, накопившихся в финальном плейстоцене и в позднеледниковье, и реконструкции растительности на окружающей озеро территории.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: alina.samus.msu@gmail.com (А.В. Самусь)

Поступила: 04 июня 2024; Принята: 03 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы исследования

Объектом данного исследования является колонка Chu13A длиной 7.45 м, полученная в результате бурения донных осадков при помощи поршневого бура Ливингстона в ложбине Чухломского озера глубиной 4.0 м. Спорово-пыльцевой анализ был проведен для 29 образцов (с 3.4 до 0.6 м) с интервалом 10 см. Лабораторная подготовка образцов включала в себя обработку 10% раствором HCl, кипячение в 10% растворе KOH, сепарацию в тяжелой жидкости (Гричук и Заклинская, 1948) и ацетолит (Мазей и Новенко, 2021). Готовые пробы просматривались под микроскопом с увеличением в 400 раз. Процентное содержание пыльцы и спор рассчитывалось от суммы пыльцы наземных растений (пыльца деревьев и кустарников + пыльца трав и кустарничков). Спорово-пыльцевая диаграмма была построена в пакете программ Tilia/TiliaGraph (Grimm, 1990); границы палинозон проведены с помощью кластерного анализа в программе CONISS.

Для отложений колонки получены восемь радиоуглеродных датировок методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) и одна датировка методом измерения содержания радиоизотопа ^{137}Cs (Филиппова и др., 2023). В программном пакете gbasop построена глубинно-возрастная модель.

3. Результаты исследования

Колонка Chu13A включает в себя следующие горизонты: 0–0.50 м – слабо консолидированный органический ил; 0.5–1.45 м – органоминеральный ил; 1.45–1.63 м – карбонатный ил; 1.63–2.5 м – органоминеральный ил с прослоем опесчаненного ила на глубине 1.95–2.15 м; 2.50–2.85 м – ил минеральный опесчаненный; ниже 2.85 м – минеральный ил.

На спорово-пыльцевой диаграмме выделено 6 локальных пыльцевых зон (ЛПЗ).

Для ЛПЗ 1 (3.4–2.55 м) характерны наибольшее процентное содержание NAP (non-arboreal pollen – пыльцы трав и кустарничков) – от 57 до 72%; высокая доля пыльцы злаков (14–24%), полыни (10–19%), маревых (3–8%), разнотравья; одновременное присутствие пыльцы тундровых (*Betula sect. Nanae*, *Alnaster*, *Saxifragaceae*), степных и луговых растений (*Bupleurum*, *Valeriana* и др.), ксерофитов (*Ephedra*, *Helianthemum*) и галофитов (*Plumbaginaceae*). В группе AP (arboreal pollen – пыльцы деревьев и кустарников) встречается пыльца ели, сосны обыкновенной и сибирской, древовидных и кустарниковых берез, ивы, лиственницы, а также типичного гелиофита – облепихи. Единичны пыльцевые зерна широколиственных пород. В ЛПЗ 2 (2.55–2.25 м) постепенно возрастает доля AP (51–62%) за счет пыльцы берез и ивы, но содержание NAP (38–49%), полыни (14–16%), маревых (9–10%) и разнотравья остается высоким. Присутствует пыльца растений, характерных для перигляциальных флор (*Thalictrum*, *Helianthemum*, *Saxifragaceae*). Отличительной особенностью палиноспектров ЛПЗ 3 (2.25–1.93 м) является максимум пыльцы *Picea* (13–40%), высокая

доля пыльцы *Betula sect. Albae* (17–25%), *Artemisia* (11–27%), *Chenopodiaceae* (8–9%). Доля AP составляет 53–67%. ЛПЗ 4 (1.93–1.73 м) характеризуется равным соотношением NAP (50–52%) и AP (48–50%), высоким содержанием пыльцы березы (в т. ч. карликовой – до 2%) и полыни (25–26%). В спорово-пыльцевых спектрах ЛПЗ 5 (1.73–1.53 м) растет доля AP (64–82%), преобладает *Betula sect. Albae* (36–64%). Содержание пыльцы *Artemisia* и *Chenopodiaceae* сокращается. Для ЛПЗ 6 (1.53–0.6 м) характерно большое количество AP (90–96%), в том числе пыльцы березы, ели, ольхи. Постоянно встречается пыльца дуба, вяза, липы, лещины.

4. Обсуждение результатов и выводы

Палинологическое исследование отложений колонки Chu13A на глубинах 3.4–0.5 м и анализ глубинно-возрастной модели позволили реконструировать основные этапы ландшафтно-климатических изменений в Костромском Заволжье в финальном плейстоцене и позднеледниковье, начиная с 19.5 тыс. кал. л.н.

Установлено, что в конце плейстоцена (19.5–16.9 тыс. кал. л.н., ЛПЗ 1) растительный покров был представлен перигляциальной степью с редким участием холодостойких пород деревьев и кустарников (лиственницы, березы карликовой, ольховника). Сочетание пустынно-степных, бореальных и тундровых элементов, наблюдаемое в спорово-пыльцевых спектрах ЛПЗ 1, вполне типично для плейстоценовых перигляциальных флор. Присутствие в этом интервале пыльцы гелиофитов (*Hippophae*, *Helianthemum*), ксерофитов (*Bupleurum*, *Ephedra*) и галофитов (*Plumbaginaceae*) указывает на широкое распространение открытых пространств в условиях холодного континентального климата. Еловые сообщества могли существовать лишь в защищенных местообитаниях, что подтверждается и результатами палинологических исследований отложений Галичского озера (Величко и др., 2001). Находки пыльцы термофильных растений (дуба, вяза, липы, лещины), вероятно, можно объяснить переотложением из межледниковых отложений, распространенных в бассейне озера, за счет эрозионных процессов в условиях разреженной растительности.

В раннем дриасе (16.9–14.7 тыс. кал. л.н.; ЛПЗ 2) в районе исследования начала расселяться береза, образуя небольшие леса и редколесья. Безлесные территории были заняты перигляциально-степными формациями. Среди травянистых сообществ уменьшилась роль злаков, флористический состав разнотравья стал менее разнообразным, но по-прежнему ксерофиты сочетались с представителями тундр и лугов. Значительную роль в растительном покрове играли сообщества из кустарниковых видов берез и ив. Во время интерстадиала бёллинг-аллерёд (14.7–12.7 тыс. кал. л.н., ЛПЗ 3) распространились еловые и березово-еловые леса и редколесья наряду с перигляциально-степными и луговыми сообществами. Участие в древостое

ели было более значимым в первую фазу потепления (бёллинг), т. к. максимум пыльцы ели приходится на нижнюю часть ЛПЗ 3. В аллереде роль ели в составе растительности сократилась. В позднем дриасе (12.7–11.7 тыс. кал. л.н., ЛПЗ 4) господствовали ландшафты березовой перигляциальной лесостепи с небольшим участием ели; открытые сообщества занимали полынно-маревые и злаково-разнотравные фитоценозы.

В начале голоцена (11.7–10.7 тыс. кал. л.н., ЛПЗ 5) началось постепенное замещение перигляциальных лесостепей березовыми лесами с участием ели и сосны. В интервале от 10.7 до 5.5 тыс. кал. л.н. в колонке фиксируется перерыв в осадконакоплении. В суббореальном периоде голоцена (ЛПЗ 6) в окрестностях озера произрастали елово-березовые леса с примесью сосны и широколиственных пород (дуба, вяза, липы, ясеня), подлесок был образован лещиной, калиной.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 23-77-10063 «Реконструкция природных событий по высокоразрешающим седиментационным палеоархивам центра Восточно-Европейской равнины за последние 25 тысяч лет».

Конфликт интересов

У авторов отсутствует конфликт интересов.

Список литературы

Величко А.А., Кременецкий К.В., Негенданк Й. и др. 2001. Позднечетвертичная история растительности Костромского Заволжья по данным палинологического изучения донных осадков Галичского озера. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 64: 5–21.

Гричук В.П., Заклинская Е.Д. 1948. Анализ ископаемых пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: ОГИЗ.

Гричук В.П. 1989. История флоры и растительности Русской равнины в плейстоцене. М.: Наука.

Карта четвертичных отложений: О-38-VII. 1972. В кн.: Бороздина З.И. (ред.). Геологическая карта СССР. Карта четвертичных отложений. Серия Мезенская, масштаб: 1:200 000. М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР.

Мазей Н.Г., Новенко Е.Ю. 2021. Применение пропиенового ангидрида при подготовке проб для спорово-пыльцевого анализа. *Nature Conservation Research*. Заповедная наука. 6(3): 110–112. DOI: [10.24189/ncr.2021.036](https://doi.org/10.24189/ncr.2021.036)

Марков К.К. 1940. Материалы к стратиграфии четвертичных отложений бассейна Верхней Волги. Труды Верхневолжской экспедиции АН СССР; Вып. 1. Л: ГЭ НИИ ЛГУ.

Филиппова К.Г., Константинов Е.А., Кузьменкова Н.В. и др. 2023. Строение и происхождение донного рельефа Чухломского озера (Костромская область). *Геоморфология и палеогеография*. 54(4): 145–162. DOI: [10.31857/S2949178923040047](https://doi.org/10.31857/S2949178923040047)

Grimm E.C. 1990. TILIA and TILIA*GRAPH.PC spreadsheet and graphics software for pollen data. *INQUA, Working Group on Data-Handling Methods, Newsletter*. 4: 5–7.

Stanols in lake sediments of Central Siberia as an indicator of anthropogenic impact

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYSinner E.K.^{1,2,*}, Boyandin A.N.², Zykov V.V.², Rogozin D.Y.^{1,2}¹ Siberian Federal University (SibFU), 79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660041, Russia² Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IBP SB RAS), Akademgorodok Str., 50/50, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660036, Russia

ABSTRACT. The bottom sediments of the lakes contain biochemical markers of fecal intake, which have been renewed interest in the last few years. This analysis is one of the newest trends in paleolimnology. Fecal markers include sterols recovered by the intestinal microflora – stanols, which are indicators of fecal intake into reservoirs. Relative to other mammals, humans produce the largest amount of coprostanol. Therefore, based on its presence in bottom sediments, the dynamics of human presence in early times can be reconstructed, as well as the fecal anthropogenic load on reservoirs. Using the gas chromatography method with mass spectrometric detection, for the first time we estimated the contents of coprostanol, epicoprostanol, 5 α -cholestanol and cholesterol in the bottom sediments of Lakes Peyungda and Zapovednoye (Evenkia, Krasnoyarsk Krai), and also estimated the indices *R1* and *R2*, reflecting the human contribution to fecal intake. The absence of an increase in the proportion of coprostanol in both lakes may indicate a slight anthropogenic impact. Both in the modern period and in earlier times (about 5000 years for Peyungda and 2500 years for Zapovednoye), there were probably no settlements near the lakes.

Keywords: fecal stanols, coprostanol, gas chromatography, lake sediments, Evenkia

For citation: Sinner E.K., Boyandin A.N., Zykov V.V., Rogozin D.Y. Stanols in lake sediments of Central Siberia as an indicator of anthropogenic impact // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 648-652. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-648

1. Introduction

In the bottom sediments of the lakes, information about the anthropogenic impact on the surrounding areas is preserved. The reconstruction of fecal intake in lake sediments allows us to obtain information about the history of the population, as well as about the modern anthropogenic load. Biochemical markers of fecal intake include stanols. Stanols are sterols recovered by the intestinal microflora. In bottom sediments, stanols persist for thousands of years, therefore they are of great value in reconstructions (White et al., 2019; Vachula et al., 2019). Similar stanols are synthesized in humans and other mammals. However, compared to animals, coprostanol is produced in humans in the largest amount. Therefore, coprostanol, together with its epimer, epicoprostanol, is used to reconstruct the history of the population (D'Anjou et al., 2012; Argiriadis et al., 2018).

2. Materials and methods

Lakes Peyungda (60°37.174' N, 101°38.442' E) and Zapovednoye (60°31.688' N, 101°43.740' E) are located on the Central Tunguska Plateau in the southern part of the Evenkia of the Krasnoyarsk Krai, on the territory of the Tunguska State Nature Reserve. The nearest settlement of Vanavara is located 60 km from the Zapovednoye. The distance between the Zapovednoye and Peyungda is about 12 km. The cores of the bottom sediments of Lake Peyungda with a length of 148 cm and Lake Zapovednoye with a length of 130 cm, selected in the central parts of the lakes, were studied. Core sampling was carried out using the UWITEC gravity sampler (Austria) with removable plastic working pipes with a diameter of 90 mm. The extraction of stanols was carried out from dried samples with a mixture of ethanol and chloroform (3:7), followed by silylation (Andaluri et al., 2017). The stanols were analyzed on an Agilent 6890N gas chromatograph using an Agilent

*Corresponding author.

E-mail address: di130polhjk@mail.ru (E.K. Sinner)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



5975C mass spectrometer as a detector (Sinner et al., 2024). External standards for coprostanol, epicoprostanol, 5 α -cholestanol and cholesterol were used to evaluate concentrations. The content of organic matter was determined by the weight loss of dried samples during calcination at 550 °C (loss on ignition, LOI550) for 4 hours (Santisteban et al., 2004).

Indices were used to assess the human contribution to the pool of fecal stanols:

$$R1 = \frac{\text{coprostanol} + \text{epicoprostanol}}{\text{coprostanol} + \text{epicoprostanol} + 5\alpha\text{-cholestanol}} \text{ (Bull et al., 1999),}$$

$$R2 = \frac{\text{coprostanol} + \text{epicoprostanol}}{\text{coprostanol} + \text{epicoprostanol} + \text{cholesterol}} \text{ (Takada et al., 1994,}$$

but with the addition of epicoprostanol to compensate for the effect of early diagenesis).

3. Results and discussion

Coprostanol, epicoprostanol, 5 α -cholestanol and cholesterol were found in the bottom sediment core of the lakes Peyungda and Zapovednoye. 5 α -cholestanol is an indicator of general fecal contamination, and cholesterol is released in the greatest amount in carnivorous animals. The simultaneous increase in the proportion of coprostanol in both indices *R1* and *R2* is not observed for both Peyungda and Zapovednoye (Fig.). It is likely that the anthropogenic load on the lakes in the studied periods was insignificant.

4. Conclusions

Using the analysis of biochemical markers of fecal intake, only a minor anthropogenic impact on the Peyungda and Zapovednoye lakes was found. In the early Lake Shira studied by us, an increase in the proportion of coprostanol was observed during periods associated with certain historical events (Sinner et al., 2024). This is due to more favorable conditions for humans than in the surrounding of the lakes Peyungda and Zapovednoye.

Acknowledgements

This work was funded by Russian Science Foundation, grant No. 22-17-00185 <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185/>.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Andaluri G., Suri R.P.S., Graham K. 2017. Steroid hormones in environmental matrices: extraction method comparison. *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 626. DOI: [10.1007/s10661-017-6345-0](https://doi.org/10.1007/s10661-017-6345-0)

Argiriadis E., Battistel D., McWethy D.B. et al. 2018. Lake sediment fecal and biomass burning biomarkers provide direct evidence for prehistoric human-lit fires in New

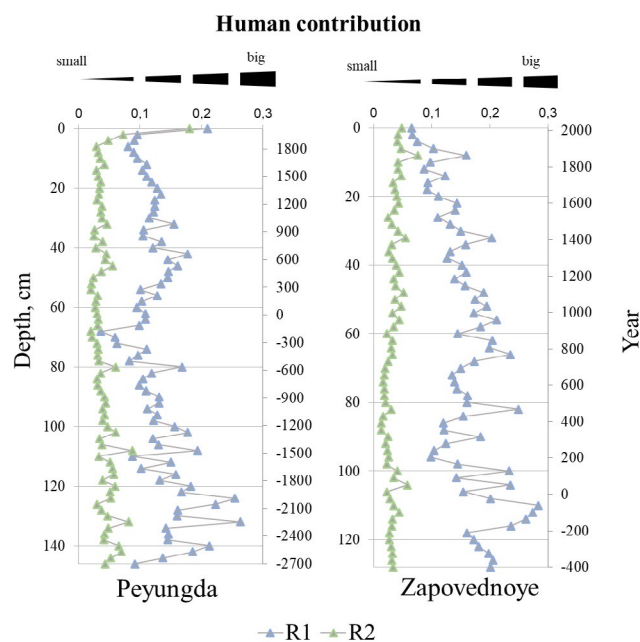


Fig. The value of the *R1* and *R2* in the core of bottom sediments of Lake Peyungda and Lake Zapovednoye.

Zealand. *Scientific Reports* 8(1):12113. DOI: [10.1038/s41598-018-30606-3](https://doi.org/10.1038/s41598-018-30606-3)

Bull I. D., Simpson I. A., van Bergen P. F., Evershed R. P. 1999. Muck “n” molecules: organic geochemical methods for detecting ancient manuring. *Antiquity* 279 (73): 86–96. DOI: [10.1017/S0003598X0008786X](https://doi.org/10.1017/S0003598X0008786X)

D’Anjou R.M., Bradley R.S., Balascio N.L., Finkelstein D.B. 2012. Climate impacts on human settlement and agricultural activities in northern Norway revealed through sediment biogeochemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 109: 20332–20337. DOI: [10.1073/pnas.1212730109](https://doi.org/10.1073/pnas.1212730109)

Santisteban J.I., Mediavilla R., Lopez-Pamo E. et al. 2004. Loss on ignition: qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments?. *Journal of Paleolimnology* 32: 287–299. DOI: [10.1023/B:JOPL.0000042999.30131.5b](https://doi.org/10.1023/B:JOPL.0000042999.30131.5b)

Sinner E.K., Boyandin A.N., Rogozin D.Y. 2024. Stanols in the Sediments of Lake Shira (Southern Siberia) as an Indicator of Fecal Influx into the Lake in the Late Holocene. *Contemporary Problems of Ecology* 17(2): 186–191. DOI: [10.1134/S1995425524020124](https://doi.org/10.1134/S1995425524020124)

Takada H., Farrington J. W., Bothner M. H. et al. 1994. Transport of Sludge-Derived Organic Pollutants to Deep-Sea Sediments at Deep Water Dump Site 106. *Environmental Science & Technology* 6(28): 1062–1072. DOI: [10.1021/es00055a015](https://doi.org/10.1021/es00055a015)

Vachula R.S., Huang Y., Longo W.L. et al. 2019. Evidence of Ice Age humans in eastern Beringia suggests early migration to North America. *Quaternary Science Reviews*. 205: 35–44. DOI: [10.1016/j.quascirev.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.003)

White A.J., Stevens L.R., Lorenzi V. et al. 2019. Fecal stanols show simultaneous flooding and seasonal precipitation change correlate with Cahokia’s population decline. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 116: 5461–5466. DOI: [10.1073/pnas.1809400116](https://doi.org/10.1073/pnas.1809400116)

Станолы в донных отложениях озёр Средней Сибири как индикатор антропогенной нагрузки

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСиннер Е.К.^{1,2*}, Бояндин А.Н.², Зыков В.В.², Рогозин Д.Ю.^{1,2}¹ Сибирский федеральный университет (СФУ), ул. Свободный 79, Красноярский край, Красноярск, 660041, Россия² Институт биофизики, Сибирское отделение Российской Академии Наук (ИБФ СО РАН), ул. Академгородок, 50/50, Красноярский край, Красноярск, 660036, Россия

АННОТАЦИЯ. Донные отложения озёр содержат биохимические маркёры фекальных поступлений, интерес к которым в последние несколько лет возобновился. Данное направление является одним из новейших в палеолимнологии. К фекальным маркёрам относят восстановленные кишечной микрофлорой стеролы – станолы, которые являются индикаторами фекальных поступлений в водоёмы. Относительно других млекопитающих, у человека вырабатывается наибольшее количество копростанола, поэтому по его наличию в донных отложениях может быть реконструирована динамика присутствия человека в ранние времена, а также оценена фекальная антропогенная нагрузка на водоёмы. Методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием нами впервые были оценены содержания копростанола, эпикопростанола, 5 α -холестанола и холестерина в донных отложениях озёр Пеюнга и Заповедное (Эвенкийский район, Красноярский край), а также оценены индексы $R1$ и $R2$, отражающие человеческий вклад в фекальные поступления. Отсутствие увеличения доли копростанола в обоих озёрах может свидетельствовать о незначительном антропогенном влиянии. Как в современный период, так и в более ранние времена (около 5000 лет для Пеюнга и 2500 лет для Заповедного), вероятно, около озёр не было поселений.

Ключевые слова: фекальные станолы, копростанол, газовая хроматография, озёрные отложения, Эвенкия

Для цитирования: Синнер Е.К., Бояндин А.Н., Зыков В.В., Рогозин Д.Ю. Станолы в донных отложениях озёр Средней Сибири как индикатор антропогенной нагрузки // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 648-652. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-648

1. Введение

В донных отложениях озёр сохраняется информация об антропогенном воздействии на прилегающие территории. Реконструкция фекальных поступлений в озёрные отложения позволяет получить информацию об истории древнего населения, а также о современной антропогенной нагрузке. К биохимическим маркёрам фекального поступления относятся станолы. Станолы – это восстановленные кишечной микрофлорой стеролы. В донных отложениях станолы способны сохраняться тысячелетиями, поэтому представляют большую ценность в реконструкциях (White et al., 2019; Vachula et al., 2019). У человека и других млекопитающих синтезируются схожие станолы, однако, по сравнению с животными, копростанол у человека вырабатывается в наибольшем количестве. Поэтому копроста-

нол совместно с его эпимером – эпикопростанолом – используется для реконструкции истории населения (D'Anjou et al., 2012; Argiriadis et al., 2018).

2. Материалы и методы

Озёра Пеюнга (60°37.174' с.ш., 101°38.442' в.д.) и Заповедное (60°31.688' с.ш., 101°43.740' в.д.) расположены на Центрально-Тунгусском плато в южной части Эвенкийского района Красноярского края, на территории Государственного природного заповедника «Тунгусский». Ближайший посёлок Ванавара расположен в 60 км от Заповедного. Расстояние между Заповедным и Пеюнгой около 12 км. Оба озера имеют почти круглую форму диаметром около 500 м – Заповедное и 600 м – Пеюнга (Рогозин и др., 2023). Исследованы керны донных отложений озера Пеюнга длиной 148 см и озера

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: di130polhjk@mail.ru (Е.К. Синнер)

Поступила: 11 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Заповедное длиной 130 см, отобранные в центральных частях озёр. Отбор кернов проводился с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) со съёмными пластиковыми рабочими трубами диаметром 90 мм. Экстракцию станолов проводили из высушенных образцов смесью этанола с хлороформом в соотношении 3:7 с последующим силированием (Andaluri et al., 2017). Станолы анализировались на газовом хроматографе Agilent 6890N с использованием в качестве детектора масс-спектрометр Agilent 5975C (Sinner et al., 2024). Для оценки концентраций использовались внешние стандарты копростанола, эпикопростанола, 5 α -холестанола и холестерина. Содержание органического вещества определялось по потере веса высушенных образцов при прокаливании при 550 °C (loss on ignition, LOI550) в течение 4 часов (Santisteban et al., 2004).

Для оценки человеческого вклада в пул фекальных станолов использовались индексы:

$$R1 = \frac{\text{копростанол} + \text{эпикопростанол}}{\text{копростанол} + \text{эпикопростанол} + 5\alpha\text{-холестанол}}$$

(Bull et al., 1999),

$$R2 = \frac{\text{копростанол} + \text{эпикопростанол}}{\text{копростанол} + \text{эпикопростанол} + \text{холестерол}}$$

(Takada et al., 1994, но с добавлением эпикопростанола для компенсации эффекта раннего диагенеза).

3. Результаты и обсуждение

В донных отложениях озёр Пеюнгда и Заповедное были обнаружены копростанол, эпикопростанол, 5 α -холестанол и холестерол. 5 α -холестанол является индикатором общего фекального загрязнения, а холестерол выделяется в наибольшем количестве у плотоядных животных. Одновременное по обоим индексам $R1$ и $R2$ увеличения доли копростанола не наблюдается как для озера Пеюнгда, так и для Заповедного (рис.). Вероятно, антропогенная нагрузка на озёра в исследованные периоды была незначительной.

4. Заключение

При помощи анализа биохимических маркеров фекального поступления было обнаружено лишь незначительное антропогенное влияние на озёра Пеюнгда и Заповедное. В раннее нами исследованном озере Ши́ра наблюдалось увеличение доли копростанола в периоды, связанными с некоторыми историческими событиями (Синнер и др., 2024). Это связано с более благоприятными для человека условиями, нежели в окрестностях озёр Пеюнгда и Заповедное.

Благодарности

Данная работа была проведена за счёт средств Российского Научного Фонда, грант № 22-17-00185 <https://rscf.ru/project/22-17-00185/>.

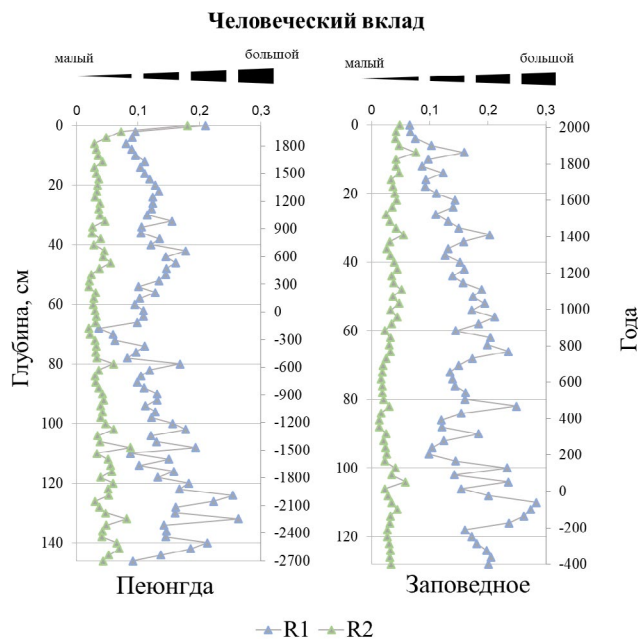


Рис. Значение индексов $R1$ и $R2$ в ядрах донных отложений озёр Пеюнгда и Заповедное.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Рогозин Д.Ю., Крылов П.С., Даутов А.Н. и др. 2023. Морфология озер Центрально-Тунгусского плато (Красноярский край, Эвенкия): новые сведения по проблеме Тунгусской катастрофы 1908 года. Доклады РАН. Науки о Земле. 510(1): 81-85. DOI:[10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)
- Синнер Е.К., Бояндин А.Н., Рогозин Д.Ю. 2024. Станолы в донных отложениях озера Ши́ра (юг Сибири) как палеоиндикатор фекальных поступлений в озеро в позднем голоцене. Сибирский экологический журнал. 2: 200–207. DOI:[10.15372/SEJ20240202](https://doi.org/10.15372/SEJ20240202)
- Andaluri G., Suri R.P.S., Graham K. 2017. Steroid hormones in environmental matrices: extraction method comparison. *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 626. DOI: [10.1007/s10661-017-6345-0](https://doi.org/10.1007/s10661-017-6345-0)
- Argiriadis E., Battistel D., McWethy D.B. et al. 2018. Lake sediment fecal and biomass burning biomarkers provide direct evidence for prehistoric human-lit fires in New Zealand. *Scientific Reports* 8(1):12113. DOI: [10.1038/s41598-018-30606-3](https://doi.org/10.1038/s41598-018-30606-3)
- Bull I. D., Simpson I. A., van Bergen P. F., Evershed R. P. 1999. Muck “n” molecules: organic geochemical methods for detecting ancient manuring. *Antiquity* 279 (73): 86–96. DOI: [10.1017/S0003598X0008786X](https://doi.org/10.1017/S0003598X0008786X)
- D’Anjou R.M., Bradley R.S., Balascio N.L., Finkelstein D.B. 2012. Climate impacts on human settlement and agricultural activities in northern Norway revealed through sediment biogeochemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*, 109: 20332–20337. DOI:[10.1073/pnas.1212730109](https://doi.org/10.1073/pnas.1212730109)

Santisteban J.I., Mediavilla R., Lopez-Pamo E. et al. 2004. Loss on ignition: qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments?. *Journal of Paleolimnology* 32: 287-299. DOI:[10.1023/B:JOPL.0000042999.30131.5b](https://doi.org/10.1023/B:JOPL.0000042999.30131.5b)

Sinner E.K., Boyandin A.N., Rogozin D.Y. 2024. Stanols in the Sediments of Lake Shira (Southern Siberia) as an Indicator of Fecal Influx into the Lake in the Late Holocene // *Contemporary Problems of Ecology* 17(2): 186-191. DOI: [10.1134/S1995425524020124](https://doi.org/10.1134/S1995425524020124)

Takada H., Farrington J. W., Bothner M. H. et al. 1994. Transport of Sludge-Derived Organic Pollutants to Deep-Sea Sediments at Deep Water Dump Site 106. *Environmental Science & Technology* 6(28): 1062-1072. DOI: [10.1021/es00055a015](https://doi.org/10.1021/es00055a015)

Vachula R.S., Huang Y., Longo W.L. et al. 2019. Evidence of Ice Age humans in eastern Beringia suggests early migration to North America. *Quaternary Science Reviews*. 205: 35-44. DOI: [10.1016/j.quascirev.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.12.003)

White A.J., Stevens L.R., Lorenzi V. et al. 2019. Fecal stanols show simultaneous flooding and seasonal precipitation change correlate with Cahokia's population decline. *Proceedings of the National Academy of Sciences U S A*. 116: 5461-5466. DOI:[10.1073/pnas.1809400116](https://doi.org/10.1073/pnas.1809400116)

An age and accumulation patterns of laminated sediments of Lake Kasplya (Smolensk region)



Shasherina L.V.*, Alexandrin M.Yu., Konstantinov E.A.,
Zakharov A.L., Rudinskaya A.I.

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny per. 29, Moscow, 119017 Russia

ABSTRACT. Presented study aims to investigate paleolimnological conditions of Lake Kasplya in north-western European Russia. An annually-laminated deposits were analyzed with ^{14}C dating, thin section study and varve counting using a semi-automated method. An annual structure is expressed in one or two pairs of layers per year (light – diatomite and calcite, dark – organomineral detritus with pyrite concretions). Differences in the structure of Early Holocene and Middle Holocene varves indicate changing paleolimnological conditions of the water body, while the disappearance of varves around 6.7 thousand years ago suggests the cessation of stable lake stratification. Due to the peculiarities of sediment structure, the obtained varve chronology is older compared to the radiocarbon sedimentation model (3,5 thousand years versus 2,5 thousand years).

Keywords: Paleolimnology, radiocarbon dating, varves, varvochronology, thin sections

For citation: Shasherina L.V., Alexandrin M.Yu., Konstantinov E.A., Zakharov A.L., Rudinskaya A.I. An age and accumulation patterns of laminated sediments of Lake Kasplya (Smolensk region) // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. - № 4. - P. 653-658. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-653](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-653)

1. Introduction

Annually-laminated lacustrine sediments (varves) serve as archives for reconstructing regional-scale paleoecological and climatic conditions. Reliable varve chronology is possible if well-preserved varves with proven annual accumulation patterns are present. Biogenic-chemogenic varves are characterized by the potential to form two pairs per year - a winter-spring pair and a summer-autumn pair (Zolitschka et al., 2015). This is due to the lake stratification features. Therefore, this type of varves often requires additional research, particularly the study of the microscopic structure of sediments in thin sections. This allows for the description of the seasonality of various varve components' accumulation and accurate counting of the annual layers (Lotter and Lemcke, 1999).

Lakes with biogenic varves are widespread in the temperate climatic zone, but such lakes in the East European Plain are almost unexplored. Lake Kasplya is a rare water body where Early Holocene varves are preserved. Studying these varves will enable high-resolution paleogeographic reconstructions. The objective of this study is to reconstruct the age and sedimentation conditions of annually-laminated deposits in Lake Kasplya.

*Corresponding author.

E-mail address: lida.sh.vs@gmail.com (L.V. Shasherina)

Received: June 02, 2024; **Accepted:** July 03, 2024;

Available online: August 26, 2024

2. Key site and regional settings

Lake Kasplya is located 35 km northwest of Smolensk, with an area of 3,2 km² and a maximum depth of 3,5 meters. The Kasplya River, which flows into the Western Dvina, originates from this lake. The lake basin is elongated in a SW-NE direction, with winding, steep shores, and in some places on the eastern side, terraced. The northern shores of the lake feature the terminal hill-ridge relief of the Valdai glaciation, while the southern shores are predominantly fluvio-glacial.

3. Materials and methods

The bottom sediments of Lake Kasplya were drilled in 2022. The reference core Kas-17, located in the deepest part of the lake, has a length of 17,3 m. The drilling was performed using a modified Livingston piston corer, collecting cores 1 meter in length end-to-end. The cores were analyzed at the Laboratory of Paleoenvironmental Archives of the Institute of Geography RAS. In the depth interval of 9,6–15,1 m, the lake sediments are rhythmically laminated (biogenic varves). The study of the structure and age of the laminations was carried out using a complex of meth-

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



ods, including: 1) radiocarbon dating (^{14}C), 2) semi-automated counting and measuring of layer thicknesses from macro photographs and 3) study of the varve structure in thin sections under direct and polarized light.

Radiocarbon dating by accelerator mass spectrometry (AMS) was performed at the Shared Research Facility “Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy” of the Institute of Geography RAS in collaboration with the Center for Applied Isotope Studies at the University of Georgia, USA. Scintillation method dating (LSC) was performed at the Laboratory of Geomorphological and Paleogeographic Studies of Polar Regions and the World Ocean of the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University. The dates were calibrated using the OxCal 4.4 program (Bronk Ramsey, 2021) with the IntCal20 calibration curve (Reimer et al., 2020). Based on four dates, an age model for the laminated deposits was constructed using the Bacon algorithm in the R software (Blaauw and Christen, 2011).

Macro photography of the cleaned cores surfaces was carried out using a Canon EOS 750D DSLR camera with a 100 mm macro lens. The resolution of the obtained images was 30-50 micrometers. Layer counting and thickness measurements were performed using ImageJ software. The counts were conducted three times by different researchers based on the white layers of the pairs. Most of the cores were shortened to 70-80 cm due to physical loss during drilling. The missing sections were calculated by interpolation. As a result, floating chronologies were obtained with depth-layer number ratio (or relative year).

Statistical analysing of the counts was performed in the DataGraph program. The obtained varve chronology was compared with the results of age modelling based on ^{14}C dating.

To study the structure of the laminations, samples were taken from the cores at 20-30 cm intervals for making thin sections. Ten thin sections, averaging 1x2 cm in size, were examined using the MEKOS-C2 scanning microscope analyzer.

4. Results and discussion

Rhythmites are represented by alternating brown layers and beige ones, with occasional gray layers between them. Visual examination of the cleaned core surfaces revealed: 1) the thickness of the varves generally increases from bottom to top, 2) at a depth of 13,4 m, there is a noticeable transition where the varves become thicker and darker, and 3) textures of bending and distortion of the laminations are observed, indicating core deformation and sediment compaction and/or lateral extrusion.

Age of sediment accumulation. According to the age model, the sediments at depths of 9,6–15,1 m accumulated between 9,2 and 6,7 thousand years ago, i.e., over approximately two and a half thousand years. The change in varve types at a depth of 14,3 m occurred around 7,9 thousand years ago, almost at the boundary between the Early and Middle Holocene.

The number of individual layer pairs in the depth interval of 9,6–15,1 m for three independent counts was 4385, 4556, and 5063 with interpolation of the missing core sections. Meanwhile, without interpolation, the counts were 3388, 3471, and 3861 pairs. Thus, the layer counts ranging from 3000 to 5000 do not correspond to the results of ^{14}C dating.

Apparently, the shortening of the cores is not due to physical loss but to sediment compaction. This occurs due to deformation from pressure and friction on the cutting edge and along the walls of the corer, as well as compression of the sediment by the piston (Glew et al., 2001).

Structure of varves and conditions of their accumulation. The microstructure of the varves changes according to observations of the cleaned core surfaces. Below 13,4 m, the varves are thin, averaging 0,7 mm, and consist of: a light layer comprising a thin diatom (pennate and centric species) sublayer and a thicker calcite sublayer, and a dark layer comprising organo-mineral detritus with spherical pyrite concretions (framboids). Above 13,4 m, the varves gradually thicken, averaging up to 1,85 mm, and become more complex in structure. In the light spring-summer layers, diatomite sublayers become thicker, the composition of the frustules becomes more diverse, and the calcite sublayer becomes thinner and sometimes disappears altogether. Pairs with two diatom or two calcite sublayers, or mixed diatom-calcite layers, are often encountered. In the dark autumn-winter layers, the content of organogenic detritus increases, while the mineral content decreases.

Repeated deposition of calcite within a single season is a factor that leads to an overestimation of the annual pairs number compared to radiocarbon age.

Above the depth of 9,6 m, the sediment becomes massive, consisting mainly of diatom frustules and a micro-crystalline calcite, with rare thin lenses of large-crystalline calcite. Pyrite concretions and plant-mineral detritus are uniformly encountered.

A typical state of a lake where biogenic varves are preserved is an eutrophic lake with a low surface area to depth ratio and at least seasonal anoxic conditions in the hypolimnion (Zolitschka et al., 2015). The change in layer structure at a depth of 13,4 m and the disappearance of varves above 9,6 m indicates a change of paleolimnological conditions in the lake. This may be associated with the lake shallowing due to the filling with sediments and an increase in bioproductivity.

5. Conclusions

As a result, two main types of varves of Lake Kasplya were identified: 1) thin (0,7 mm) Early Holocene varves and 2) thickened (1,85 mm) Middle Holocene varves. It was found that intra-seasonal fluctuations created both one and two pairs of layers per year. This introduced ambiguity in the counting of annual pairs, and the constructed varve chronology overestimated the age relative to the radiocarbon age-depth model (3-5 thousand years versus 2.5 thousand years).

Acknowledgements

The study was supported by the Russian Science Foundation Project 23-77-10063.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal.* 6(3): 457–474. DOI:[10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)
Bronk Ramsey C. 2021. OxCal 4.4.: [https://c14.arch.](https://c14.arch.ox.ac.uk/Oxcal/OxCal.html)

[ox.ac.uk/Oxcal/OxCal.html](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x)

Glew J. R., Smol J. P., Last W. M. 2001. Sediment Core Collection and Extrusion. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. *Developments in Paleoenvironmental Research*. Dordrecht: Springer 1: 73–105.

Lotter A.F., Lemcke G. 1999. Methods for preparing and counting biochemical varves. *Boreas* 28: 243–252. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x)

Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725–757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)

Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K. et al. 2015. Varves in lake sediments – a review. *Quaternary Science Review* 117: 1–41. DOI: [10.1016/j.quascirev.2015.03.019](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019)

Возраст и условия накопления ритмично-слоистых отложений оз. Каспля (Смоленская область)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYШашерина Л.В.*, Александрин М.Ю., Константинов Е.А.,
Захаров А.Л., Рудинская А.И.

Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер. 29, Москва, 119017 Россия

АННОТАЦИЯ. Данное исследование посвящено реконструкции палеолимнологических условий в оз. Каспля (Смоленская область). Толща ритмично-слоистых отложений была исследована радиоуглеродным методом, микроморфологическим описанием по шлифам. Выполнен подсчёт пар слоёв полуавтоматическим методом. Выявлена годовичная структура, которая выражается в одной либо двух парах слоёв за год (светлый – диатомит и кальцит, тёмный – органоминеральный детрит с конкрециями пирита). Различия в строении раннеголоценовых и среднеголоценовых варв указывают на менявшиеся палеолимнологические условия водоёма, а исчезновение варв около 6,7 л.н. – на прекращение устойчивой озёрной стратификации. Вследствие особенности строения осадков, полученная варвохронология удревнена относительно радиоуглеродной модели осадконакопления (3,5 тыс. против 2,5 тыс. лет).

Ключевые слова: палеолимнология, радиоуглеродное датирование, варвы, варвохронология, шлифы

Для цитирования: Шашерина Л.В., Александрин М.Ю., Константинов Е.А., Захаров А.Л., Рудинская А.И. Возраст и условия накопления ритмично-слоистых отложений оз. Каспля (Смоленская область) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 653-658. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-653

1. Введение

Годично-слоистые осадки озёр (варвы) являются архивами для реконструкций палеоэкологических и климатических условий регионального масштаба. Построение надёжной варвохронологии возможно в случае хорошо сохранившейся слоистости с доказанным годовичным накоплением пары слоёв. Биогенно-хемогенные варвы отличаются тем, что могут накапливаться по две пары за год, в зимне-весенний и летне-осенний сезоны (Zolitschka et al., 2015). Это обусловлено особенностями озёрной стратификации. Поэтому изучение данного типа варв часто требует применения дополнительных методов, в частности, описания строения осадка в шлифах. Оно позволяет реконструировать сезонность накопления различных компонентов варв и надёжно посчитать годовичные слои (Lotter and Lemcke, 1999).

Озёра с биогенно-хемогенными варвами распространены в умеренном климатическом поясе, но подобные озёра Восточно-Европейской равнины почти не исследованы. Озеро Каспля – редкий водоём, в котором сохранены раннеголоценовые

варвы. Изучение варв позволит выполнить палеогеографические реконструкции высокого разрешения. Цель работы – реконструировать возраст и условия осадконакопления ритмично-слоистых отложений в оз. Каспля (Смоленская область).

2. Объект исследования

Озеро Каспля расположено в 35 км к северо-западу от Смоленска, имеет площадь 3,2 км², максимальную глубину – 3,5 м. Из озера берёт начало р. Каспля, впадающая в Западную Двину. Озёрная котловина вытянута в ЮЗ-СВ направлении, берега извилистые, крутые, в отдельных местах с восточной стороны – террасированные. Берега озера в северной части – это краевой холмисто-грядовый рельеф валдайского оледенения, а в южной части – преимущественно водноледниковый рельеф.

3. Материалы и методы

Донные отложения озера пробурены в 2022 году. Опорная колонка Kas-17, расположенная в

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lida.sh.vs@gmail.com (Л.В. Шашерина)

Поступила: 02 июня 2024; Принята: 03 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



наиболее глубокой части озера, имеет длину 17,3 м. Бурение выполнено модифицированным поршневым буром Ливингстона с отбором кернов по 1 м длиной стык в стык. Керны были проанализированы в Лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН. В интервале глубин 9,6–15,1 м озёрные осадки ритмично-слоистые (биогео-хемогенные варвы). Определение структуры и возраста слоистости выполнено комплексом методов, включающим: 1) радиоуглеродное датирование (^{14}C), 2) подсчёт количества и измерение толщины слоёв полуавтоматическим способом по макрофотографиям и 3) изучение строения варв в шлифах в прямом и поляризованном свете

Радиоуглеродное датирование методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS) выполнено в лаборатории ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН в сотрудничестве с Центром прикладных изотопных исследований университета Джорджии, США. Датирование сцинтилляционным методом (LSC) выполнено в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института Наук о земле СПбГУ. Даты откалиброваны в программе OxCal 4.4. (Bronk Ramsey, 2021) используя калибровочную кривую IntCal20 (Reimer et al., 2020). На основе 4 датировок при помощи алгоритма Bacon в среде R (Blaauw and Christen, 2011) построена возрастная модель для ритмично-слоистой толщи.

Макрофотосъёмка кернов выполнена при помощи зеркальной камеры Canon EOS 750D с макро-объективом 100 мм. Разрешение полученных снимков - 30-50 мкм, на них отчётливо видна текстура осадка. По полученным изображениям в программе ImageJ выполнен подсчёт слоёв и измерение их толщины. Подсчёт выполнен трижды разными исследователями по белым прослоям пары. Почти все керны были укороченными, длиной 70-80 см, из-за физической потери в процессе бурения. Недостающие участки были рассчитаны путем интерполяции. В итоге были получены плавающие хронологии с соотношением глубина-номер слоя (или относительный год).

Статистическая обработка подсчёта выполнена в программе DataGraph. Там же полученная варвохронология сопоставлена с результатами возрастного моделирования по ^{14}C датированию.

Для изучения строения слоистости с шагом 20-30 см из кернов были отобраны образцы для изготовления шлифов. 10 шлифов, средним размером 1x2 см, были изучены на сканирующем микроскопе-анализаторе МЕКОС-Ц2.

4. Результаты и дискуссия

Ритмики представлены чередованием коричневых прослоев и менее мощных бежевых, дополнительно между ними иногда отмечаются прослойки серого цвета. По результатам визуального изучения зачищенных поверхностей кернов: 1) толщина варв,

в целом, увеличивается снизу вверх, 2) на глубине 13,4 м визуальное заметное изменение – варвы становятся толще и темнее, 3) встречаются текстуры загибания и искажения слоистости, указывающие на деформацию кернов и уплотнение и/или латеральное выдавливание осадка.

Возраст накопления отложений. Согласно возрастной модели, отложения на глубинах 9,6–15,1 м накопились в период с 9,2 по 6,7 тыс. л.н. то есть примерно за две с половиной тысячи лет. Смена типов варв на глубине 14,3 м произошла около 7,9 тыс. л.н., почти на границе раннего и среднего голоцена.

Количество индивидуальных пар слоев в интервале глубин 9,6–15,1 м для трех независимых подсчетов составило 4385, 4556 и 5063 при интерполяции недостающих частей кернов. В то же время без интерполяции подсчеты составили 3388, 3471 и 3861 пар. Подсчет слоев в 3000-5000 единиц, таким образом, не соответствует результатам ^{14}C датирования.

По-видимому, укорочение кернов связано не с физической потерей, а с уплотнением осадка. Это происходит из-за деформаций давления и трения на режущей кромке и вдоль стенок пробоотборника, а также со сдавливанием осадка поршнем (Glew et al., 2001).

Строение варв и условия их накопления. Микростроение варв меняется согласно наблюдениям зачищенной поверхности кернов. Ниже 13,4 м варвы тонкие – 0,7 мм в среднем – состоят: светлый слой состоит из тонкого прослоя диатомовых (пеннатных и центрических видов) и более толстого кальцитового, темный слой – органо-минеральный детрит со сферическими конкрециями пирита (фрагментами). Выше 13,4 м варвы постепенно утолщаются, в среднем до 1,85 мм, становятся сложнее по структуре. В светлых весенне-летних слоях прослойки диатомита становятся толще, состав панцирей – разнообразнее, а кальцита – тоньше и порой вовсе исчезают. Часто встречаются пары с двумя диатомовыми или двумя кальцитовыми прослоями, либо смешанные диатомово-кальцитовые слои. В темных осенне-зимних прослоях содержание органического детрита возрастает, а минерального – падает.

Повторное осаждение кальцита за один сезон – фактор завышения подсчёта годовых пар по сравнению с радиоуглеродным датированием.

Выше глубины 9,6 м осадок становится массивным, состоящим в основном из панцирей диатомовых водорослей и микрокристаллического кальцита, с редкими тонкими линзами крупнокристаллического кальцита. Равномерно встречаются конкреции пирита и растительно-минеральный детрит.

Типичный портрет озера, в котором сохраняются биогео-хемогенные варвы – эвтрофное озеро с низким соотношением площади поверхности к глубине и, по крайней мере, сезонными бескислородными условиями в гипolimнионе (Zolitschka et al., 2015). Изменение строения слоёв на глубине

13,4 м и исчезновение варв выше 9,6 м – индикатор смены палеолимнологических условий в водоёме. Возможно, это связано с обмелением озера вследствие заполнения озерной котловины и повышением биопродуктивности.

5. Заключение

В результате исследования ритмично-слоистой части осадков оз. Каспля выявлены два основных типа варв: 1) тонкие (0,7 мм) раннеголоценовые и 2) утолщённые (1,85 мм) среднеголоценовые. Выявлено, что внутрисезонные колебания создавали как одну, так и две пары слоёв за один год. Это привнесло неоднозначность в подсчёте годовых пар, и построенная варвохронология завышает возраст толщи варв относительно радиоуглеродной возрастной модели (3-5 тыс. против 2,5 тыс. лет).

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РФФ, проект № 23-77-10063.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Blaauw M., Christen J.A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal.* 6(3): 457–474. DOI: [10.1214/11-BA618](https://doi.org/10.1214/11-BA618)
- Bronk Ramsey C. 2021. OxCal 4.4.: <https://c14.arch.ox.ac.uk/Oxcal/OxCal.html>
- Glew J. R., Smol J. P., Last W. M. 2001. Sediment Core Collection and Extrusion. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. *Developments in Paleoenvironmental Research*. Dordrecht: Springer 1: 73–105.
- Lotter A.F., Lemcke G. 1999. Methods for preparing and counting biochemical varves. *Boreas* 28:243–252. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00218.x)
- Reimer P., Austin W., Bard E. et al. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62(4): 725–757. DOI: [10.1017/RDC.2020.41](https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41)
- Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K. et al. 2015. Varves in lake sediments – a review. *Quaternary Science Review* 117: 1–41. DOI: [10.1016/j.quascirev.2015.03.019](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.019)

Sediment geochemistry of Lake Portlubol (Murmansk region): natural anomalies and reconstruction of anthropogenic events in the catchment

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Slukovskii Z.I.*, Dauvalter V.A.

Institute of the North Industrial Ecology Problems of Kola Science Center of RAS, Akademgorodok Str., 14a, Apatity, 184209, Russia

ABSTRACT. The article presents the first data on the content of a wide range of rare elements in modern sediments of Lake Portlubol, located in the north of the Murmansk region (Arctic zone of the Russian Federation). The authors identified extremely elevated concentrations of U and Mo compared to the Clarke and background levels, which is associated with the geological features of the study area. Also, in the upper layers of the sediment core of Lake Portlubol, an increase in the content of Pb, Cd, Ni, Cu and some other elements was noted, which probably entered the reservoir as a result of emissions from industrial enterprises in the region and neighboring territories. Despite the identified geochemical anomalies in the sediments, the lake can be considered background, since the established anthropogenic load is small compared to lakes in urban and industrial areas of the Murmansk region.

Keywords: Geochemistry of sediments, background lakes, heavy metals, uranium, Arctic zone of the Russian Federation

For citation: Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A. Sediment geochemistry of Lake Portlubol (Murmansk region): natural anomalies and reconstruction of anthropogenic events in the catchment // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 659-664. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-659

1. Introduction

Lake sediments can serve as indicators of various processes in and around bodies of water. Such processes include anthropogenic impact and the influence of various natural factors, most often associated with the geology of the study area. For example, the use of leaded gasoline in transportation operations is known to influence elevated Pb concentrations in lake sediments (Escobar et al., 2023; Rognerud et al., 2013). Also, increased concentrations of chemical elements in lake sediments can be influenced by natural factors associated with the geochemical composition of rocks in the study area (Fang et al., 2023), as well as geological events such as catastrophic volcanic eruptions (Jensen, 2012).

There are more than 100 thousand lakes in the Murmansk region, most of which are up to 1 km² in size. Sediments of many lakes in the region located in background areas are extremely poorly studied. This applies primarily to the chemical composition of lake water and sediments, which are important in the initial assessment of the condition of the reservoir. The purpose of this work is to assess the ecological and geochemical features of modern sediments of Lake

Portlubol, located in the north of the Murmansk region, using as a basis the sediment core and the content of 40 chemical elements determined by ICP-MS.

2. Materials and methods

The sediment core of Lake Portlubol was sampled in the spring of 2021 from the ice of the lake. The depth of the lake at the work site was about 15 meters. Using a Limnos sampler, a core 53 cm long was obtained, which was divided into layers of 1 cm for examination. During laboratory studies, the ash content of the studied sediments (average value 73.2%) and the content of rare elements, including heavy metals, were determined. Chemical analysis was performed using an XSeries-2 ICP-MS inductively coupled plasma mass spectrometer. The results obtained during the study of the chemical composition of lake sediments. Portlubol showed the following:

3. Results and discussion

The studied sediments, on average throughout the core, are enriched in U, Mo, Cd, Th, Zn, Tl, and rare

*Corresponding author.

E-mail address: slukovsky87@gmail.com (Z.I. Slukovskii)

Received: June 07, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



earth elements (REE) compared to the average composition of the earth's crust. These patterns are shown in Figure 1. The highest concentration coefficients were identified for Mo (92) and U (23). This is due to the fact that the catchment area of Lake Portlubol is located within the Litsevsky geological uranium ore district, on the territory of which there are rare earth-thorium-uranium mineralization in pegmatite granites (Kaulina et al., 2021). Anomalies of U and Mo were previously noted in sediments of lakes, also located in the north of the Murmansk region in the zone of influence of the Litsevsky geological region (Slukovskii et al., 2020; Slukovskii et al., 2024).

A close correlation (0.95) was revealed between the content of U and REE in the sediments of Lake Portlubol, which is probably due to the common sources of these elements entering the lakes from the catchment area and the common mechanisms of fixation in the sediments of the reservoir. It has also been established that the REE content in the sediments of Lake Portlubol is 2-7 times higher than in the rocks of the Dikoe ore occurrence (Kaulina et al., 2021), which indicates that in the sediments of the lake there is an increase and concentration of REE, probably account of the fine fraction of sediments and organic matter. The dynamics of the behavior of REE and a number of other lithophile elements in the sediment core of Lake Portlubol is similar to their behavior in other lakes of the background areas of the north of the Murmansk region.

It has been shown that the main source of heavy metals, and primarily Ni and Cu, into the environment in the area of Lake Portlubol at a distance of several tens of kilometers are emissions from the Pechenganikel plant (Rognerud et al., 2013; Dauvalter et al., 2015). An increase in the upper layers of sediments of Lake Portlubol compared to the background layers of Ni (7 times), Cu (5), Sb (11), Pb (6), Bi (7), Sn (4), Cd (2), Co (2), Zn (1.5). It was also revealed that these elements closely correlate with each other, forming a special ("technogenic") association of chemical elements in the studied sediments of the background lake. Similar patterns were noted when assessing the geochemical features of background lakes on the Rybachy and Sredniy peninsulas (also in the north of the Murmansk region).

However, comparison with previously studied lakes in the city of Murmansk (Lakes..., 2023) and lakes near industrial enterprises in the region shows that the sediments of Lake Potlubol are significantly less polluted with heavy metals, despite the presence of a technogenic influence on the lake from emissions from factories. At the same time, it is necessary to further conduct research (monitoring) of this reservoir and its sediments, as well as lakes located near it.

Acknowledgements

The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation under grant No. 24-17-20006.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Dauvalter V.A., Kashulin N.A., Denisov D.B. 2015. Tendencies in the content change of heavy metals in lake sediments in northern Fennoscandia over the last centuries. *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 9: 62–75. (In Russian)
- Escobar J., Whitmore T.J., Kamenov G.D., Riedinger-Whitmore M.A. 2023. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *J. Paleolimnol.* 49 (2): 237-252. DOI: [10.1007/s10933-012-9671-9](https://doi.org/10.1007/s10933-012-9671-9)
- Fang X., Peng B., Guo X., Wu S., Xie Sh., Wu J., Yang X., Chen H., Dai Y. 2023. Distribution, source and contamination of rare earth elements in sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, China. *Environ. Pollut.* 336: 122384. DOI: [10.1016/j.envpol.2023.122384](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122384)
- Jensen B.J.L. 2012. Regional Correlation of the AD 1600 Huaynaputina Tephra: Integrating Archaeological, Ice Core and Lacustrine Records. *Quaternary International*. 279-280: 221–222. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.08.458](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.08.458)
- Kaulina T.V., Afanasyeva E.N., Ilchenko V.L., Avedisyan A.A., Nerovich L.I., Lyalina L.M., Nitkina E.A., Mokrushina O.D. 2021. Litsevsky uranium-ore district. Moscow: GEOS. (In Russian)
- Lakes of the city of Murmansk: hydrological, hydrochemical and hydrobiological features. 2023. Moiseenko T.I. (eds.). Apatity: Publishing house of the Federal Research Center KSC RAS. (In Russian)

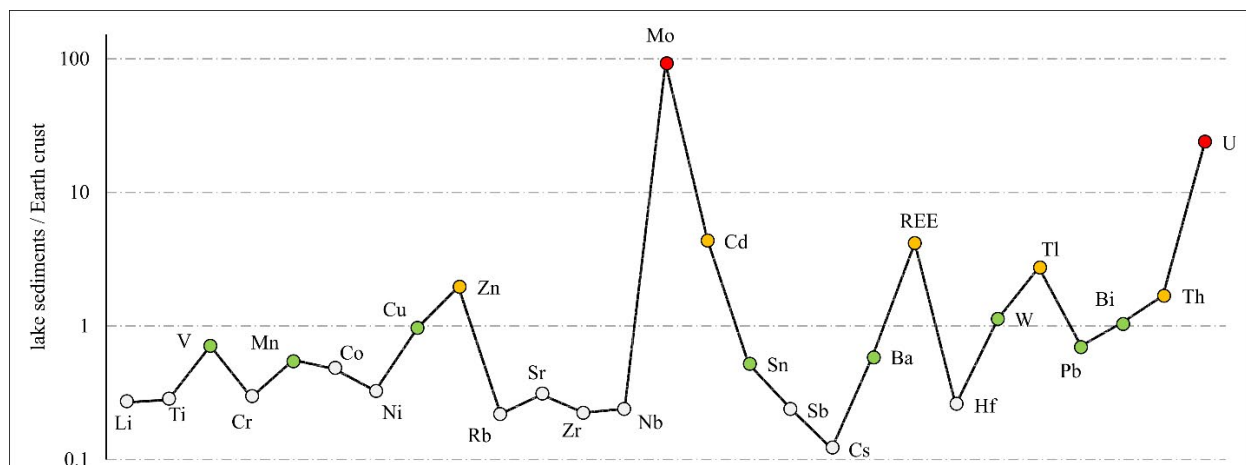


Fig. 1. Normalized concentrations of elements in Lake Portlubol sediments (median values for the sediment core) relative to the average composition of the Earth's crust (Wedepohl, 1995)

Rognerud S., Dauvalter V.A., Fjeld E., Skjelkvåle B.L., Christensen G., Kashulin N. 2013. Spatial Trends of Trace-Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni–Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic. *AMBIO*. 42 (6): 724–736.

Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A., Udachin V.N., Denisov D.B. 2020. Uranium Anomalies in Recent Sediments of Lakes from the Northern Part of the Murmansk Region, Arctic. *Geochem. Int.* 58 (12): 1400–1404. DOI: [10.1134/S0016702920100134](https://doi.org/10.1134/S0016702920100134)

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtzeva L. 2024. Chemical Composition of Water and Recent Sediments of Small Tundra Lakes in the Background Area of the North of Murmansk Region (Arctic). *International Journal of Environmental Research*. 18: 57. DOI: [10.1007/s41742-024-00612-7](https://doi.org/10.1007/s41742-024-00612-7)

Wedepohl K.H. 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 59: 1217–1232.

Геохимические особенности отложений озера Портлубол (Мурманская область): природные аномалии и реконструкция техногенных событий на водосборе

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Слуковский З.И.* , Даувальтер В.А.

Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН, ул. Академгородок, 14а, Апатиты, 184209, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлены первые данные по содержанию большого спектра редких элементов в современных отложениях озера Портлубол, расположенного на севере Мурманской области (Арктическая зона РФ). Авторами выявлены крайне повышенные по сравнению с кларком и фоном концентрации U и Mo, что связано с особенностями геологии района исследования. Также в верхних слоях колонки отложений озера Портлубол отмечено увеличение содержания Pb, Cd, Ni, Cu и некоторых других элементов, которые, вероятно, попали в водоем в результате выбросов промышленных предприятий региона и соседних территорий. Несмотря на выявленные геохимические аномалии в отложениях, озеро можно считать фоновым, так как установленная антропогенная нагрузка невелика по сравнению с озерами городских и промышленных районов Мурманской области.

Ключевые слова: Геохимия донных отложений, фоновые озера, тяжелые металлы, уран, Арктическая зона РФ

Для цитирования: Слуковский З.И., Даувальтер В.А. Геохимические особенности отложений озера Портлубол (Мурманская область): природные аномалии и реконструкция техногенных событий на водосборе // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 659-664. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-659

1. Введение

Озерные отложения могут служить индикаторами различных процессов внутри и вокруг водоемов. К таким процессам относится антропогенное воздействие и влияние различных природных факторов, чаще всего связанных с геологией района исследования. Например, известно влияние использования этилированного бензина в транспортных операциях на повышенные концентрации Pb в донных отложениях озер (Escobar et al., 2023; Rognerud et al., 2013). Также на на повышенные концентрации химических элементов в озерных отложениях могут влиять и природные факторы, связанные с геохимическим составом пород района исследований (Fang et al., 2023), а также геологические события, как катастрофические вулканические извержения. извержения (Jensen, 2012).

В Мурманской области насчитывается более 100 тысяч озер, большинство из которых имеют размеры до 1 км². Донные отложения многих озер региона, расположенных на фоновых районах, крайне слабо изучены. Это относится в первую

очередь к химическому составу воды и отложений озер, которые важны при первичной оценке состояния водоема. Цель данной работы – оценить эколого-геохимические особенности современных отложений озера Портлубол, расположенного на севере Мурманской области, используя в качестве основы колонку донных отложений и содержание 40 химических элементов, определенных методом ICP-MS.

2. Материалы и методы

Отбор колонки донных отложений озера Портлубол был выполнен весной 2021 года со льда озера. Глубина озера в месте работы составляла около 15 метров. При помощи пробоотборника Limnos была получена колонка длиной 53 см, которую для исследования разделили на слои по 1 см. В ходе лабораторных исследований была определена зольность изученных отложений (среднее значение 73.2 %) и содержание редких элементов, включая тяжелые металлы. Химический анализ выполнялся при помощи масс-спектрометра с индуктивно свя-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: slukovsky87@gmail.com (З.И. Слуковский)

Поступила: 07 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024



занной плазмой XSeries-2 ICP-MS. Результаты, полученные в ходе исследования химического состава отложений оз. Портлубол показали следующее:

3. Результаты и обсуждение

Изученные отложения в среднем по колонке обогащены по сравнению со средним составом земной коры U, Mo, Cd, Th, Zn, Tl и редкоземельными элементами (РЗЭ). Эти закономерности показаны на рисунке 1. Наибольшие коэффициенты концентрации выявлены по Mo (92) и U (23). Это связано с тем, что водосбор озера Портлубол расположен в пределах Лицевского геологического урановорудного района, на территории которого находятся редкоземельно-торий-урановые оруденения в пегматитовых гранитах (Каулина и др., 2021). Ранее уже отмечались аномалии U и Mo в отложениях озер, также расположенных на севере Мурманской области в зоне влияния Лицевского геологического района (Slukovskii et al., 2020; Slukovskii et al., 2024).

Выявлена тесная корреляционная связь (0.95) между содержанием U и РЗЭ в отложениях озера Портлубол, что, вероятно, связано с единым источником поступления этих элементов в озера с водосбора и едиными механизмами закрепления в донных отложениях водоема. Также установлено, что содержание РЗЭ в отложениях озера Портлубол в 2-7 раз выше, чем в горных породах рудопоявления Дикое (Каулина и др., 2021), что говорит о том, что в осадках озера происходит увеличение и концентрация РЗЭ, вероятно, за счет тонкой фракции отложений и органического вещества. Динамика поведения РЗЭ и ряда других литофильных элементов в колонке отложений озера Портлубол схожа с поведением их в других озерах фоновых районов севера Мурманской области.

Показано, что главным источником поступления тяжелых металлов, и в первую очередь Ni и Cu, в окружающую среду в районе озера Портлубол на расстоянии нескольких десятков километров являются выбросы комбината «Печенганикель» (Rognerud et al., 2013; Даувальтер и др., 2015).

Установлено увеличение в верхних слоях отложений озера Портлубол по сравнению с фоновыми слоями Ni (в 7 раз), Cu (5), Sb (11), Pb (6), Bi (7), Sn (4), Cd (2), Co (2), Zn (1.5). Также выявлено, что эти элементы тесно коррелируют между собой, выделяясь в особую («техногенную») ассоциацию химических элементов в изученных отложениях фоновых озер. Схожие закономерности отмечены были при оценке геохимических особенностей фоновых озер на полуостровах Рыбачий и Средний (также север Мурманской области).

Однако сравнение с ранее изученными озерами города Мурманска (Озёра..., 2023) и озерами вблизи промышленных предприятий региона показывает, что отложения озера Потлубол существенно меньше загрязнены тяжелыми металлами, несмотря на наличие техногенного влияния на озеро от выбросов заводов. При этом необходимо дальше проводить исследования (мониторинг) этого водоема и его отложений, а также озер, расположенных вблизи него.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках гранта № 24-17-20006.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Денисов Д.Б. 2015. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия. Труды Карельского научного центра РАН. 9: 62-75.
- Каулина Т.В., Афанасьева Е.Н., Ильченко В.Л., Аведисян А.А., Нерович Л.И., Лялина Л.М., Ниткина Е.А., Мокрушина О.Д. 2021. Лицевский урановорудный район. М: ГЕОС.

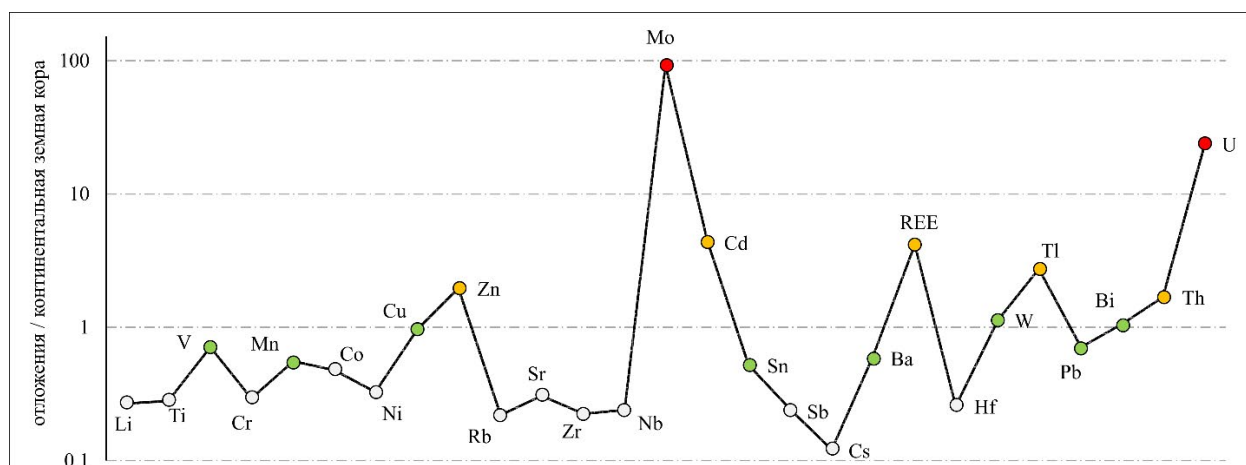


Рис.1. Нормированные концентрации элементов в отложениях озера Портлубол (медианные значения по колонке отложений) относительно среднего состава земной коры (Wedepohl, 1995)

Озёра города Мурманска: гидрологические, гидрохимические и гидробиологические особенности: монография. 2023. Моисеенко Т.И. (ред.). Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН.

Escobar J., Whitmore T.J., Kamenov G.D., Riedinger-Whitmore M.A. 2023. Isotope record of anthropogenic lead pollution in lake sediments of Florida, USA. *J. Paleolimnol.* 49 (2): 237-252. DOI: [10.1007/s10933-012-9671-9](https://doi.org/10.1007/s10933-012-9671-9)

Fang X., Peng B., Guo X., Wu S., Xie Sh., Wu J., Yang X., Chen H., Dai Y. 2023. Distribution, source and contamination of rare earth elements in sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, China. *Environ. Pollut.* 336: 122384. DOI: [10.1016/j.envpol.2023.122384](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122384)

Jensen B.J.L. 2012. Regional Correlation of the AD 1600 Huaynaputina Tephra: Integrating Archaeological, Ice Core and Lacustrine Records. *Quaternary International.* 279-280: 221-222. DOI: [10.1016/j.quaint.2012.08.458](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.08.458)

Rognerud S., Dauvalter V.A., Fjeld E., Skjelkvåle B.L., Christensen G., Kashulin N. 2013. Spatial Trends of Trace-

Element Contamination in Recently Deposited Lake Sediment Around the Ni-Cu Smelter at Nikel, Kola Peninsula, Russian Arctic. *AMBIO.* 42 (6): 724-736.

Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A., Udachin V.N., Denisov D.B. 2020. Uranium Anomalies in Recent Sediments of Lakes from the Northern Part of the Murmansk Region, Arctic. *Geochem. Int.* 58 (12): 1400-1404. DOI: [10.1134/S0016702920100134](https://doi.org/10.1134/S0016702920100134)

Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtzeva L. 2024. Chemical Composition of Water and Recent Sediments of Small Tundra Lakes in the Background Area of the North of Murmansk Region (Arctic). *International Journal of Environmental Research.* 18: 57. DOI: [10.1007/s41742-024-00612-7](https://doi.org/10.1007/s41742-024-00612-7)

Wedepohl K.H. 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 59: 1217-1232.

Environmental evolution of the south shore of Kandalaksha Bay, as indicated by the study of bottom sediments from small lakes

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Shelekhova T.S.*, Lavrova N.B.

Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya St., 11, Petrozavodsk, 185910, Karelia, Russia

ABSTRACT. Environmental changes on the south shore of Kandalaksha Bay in Holocene time were reconstructed by analyzing the data obtained by palynological and ^{14}C methods. Diatom complexes of marine, freshwater and transition facies are described. The possible application of pollen indicators for a better understanding of the genesis of sediments is discussed.

Keywords: Holocene, bottom sediments, pollen analysis, diatom analysis, White Sea

For citation: Shelekhova T.S., Lavrova N.B. Environmental evolution of the south shore of Kandalaksha Bay, as indicated by the study of bottom sediments from small lakes // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 665-669. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-665

1. Introduction

The study of ancient ecosystems' dynamics is becoming increasingly essential as various scenarios of environmental conditions are proposed. Variations in the relative White Sea level in Late Glacial and Holocene time have been the subject of numerous studies (Kolka et al., 2019; Shelekhova et al., 2021; 2024). The evolutionary dynamics of the south Kandalaksha Bay shore is poorly understood. Bottom sediments from small lake basins, which existed earlier as part of large basins earlier, contain a complete record of variations in ancient natural environments. Diatom and palynological data on bottom sediments from the small lakes located on the south shore of Kandalaksha Bay were analyzed to reveal general trends in environmental evolution.

2. Materials and methods

Material for the present study was provided by cores from the small lakes located at an altitude of 10 to 28 m above sea level. Methods for preparing and studying samples by diatom and palynological analyses are described in (Shelekhova et al., 2021). Data on and paleogeographic materials from the nearest areas were analyzed and compared. The data were compared with the chronological units of the Holocene using the periodization accepted by the International Commission on Stratigraphy (Cohen and Gibbard, 2019).

*Corresponding author.

E-mail address: shelekh@krc.karelia.ru (T.S. Shelekhova)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

3. Results and discussion

Early Holocene. Pollen complexes contain an abundance of *Pinus* pollen (maximum 88%). *Betula* sect. *Albae* pollen makes up no more than 20-30%. Grasses are dominated by Poaceae and Cyperaceae pollen (each taxon accounts for 5-10%), while *Artemisia* and Chenopodiaceae pollen makes up 1-2%. Spore plants are dominated by Polypodiaceae (less than 1%) and sub-dominated by Lycopodiaceae. A decrease in the base level of erosion, provoked by the ongoing glacio-isostatic uplift of the Baltic Shield, triggered a decline in groundwater level in the study area. These factors contributed to the active spreading of pine, which occupied habitats conducive to its growth. The study area was occupied by monodominant pine and thin birch-pine forests. Their thinness is indicated by the presence of club-moss (*Diphasiastrum alpinum*, *D. complanatum*, *L. pungens*) in Early Holocene sediments. Sedimentation took place in a sea basin, as indicated by the diatoms *Hyalodiscus* spp., *Grammatophora* spp., *Paralia sulcata*, *Trachyneis aspera*, *Rhabdonema* spp. *Amphora* spp., *Diploneis* spp., etc. *Dimerogramma* spp., *Lyrella* spp., *Melosira nummuloides*, *Talassionema nitzschioides*, *Mastogloia* spp., etc. The same is indicated by the pollen of the halophytes *Plantago maritima*. *Salicornia herbacea*, *Atriplex nudicaulis* and Juncaginaceae (*Triglochin maritima*). Asteraceae (*Aster* type) pollen was identified by the authors as *Tripolium vulgare*. This species

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



is abundant in various plant communities in the White Sea's tidal zone.

Middle Holocene. The distinctive feature of the pollen spectra analyzed is the presence of *Ulmus*, *Tilia*, *Quercus* and *Corylus* pollen. Spore-and-pollen spectra were probably enriched in pollen produced by broad-leaved trees in warm, humid climate. A small quantity of the pollen of thermophilic woody plants suggests that it was carried by wind from areas located farther south. The northern boundaries of the areas occupied by broad-leaved trees were probably close to the study area. The spectra are dominated by *Pinus* (40-70%). *Betula* sect. *Albae* makes up 35 to 40%. *Picea* makes up 5% and *Alnus* 5-7%. Grasses are dominated by Poaceae and Cyperaceae pollen. Lycopodiaceae becomes less abundant. In the early Middle Holocene, the study area was dominated by north-taiga pine and birch-pine forests. In the mid-Middle Holocene, the lakes were separated. The lake located at an altitude of 28 m above sea level was the first to separate. The lake located at an altitude of 22 m was the next to separate. This process is reflected in diatom complexes (transition zone) displaying a decrease in the contribution of brackish water species to 60-40% and the increased contribution of the freshwater forms *Fragilaria* sensu lato (*Fragilariforma constricta*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Pseudostaurosira parasitica*, *Staurosira venter*) and the scarcity of *Discotella stelligera*, *Epithemia* sp., *Navicula radiosa*, *Tabellaria flocculosa*, *Ulnaria ulna*, etc.

In addition to halophyte pollen, the pollen spectra contain the pollen of plants from freshwater bodies (*Myriophyllum*, *Sparganium* and *Typha*, *Isoetes* spores and *Pediastrum* algae).

The pollen spectra for the late Middle Holocene display the increased contribution of *Picea* (~15%) and *Alnus* (~10%) pollen. Our reconstructions show that the study area was dominated by mid-taiga pine forests with mountain ash in the undergrowth. Pine-spruce forests were confined to the most favourable habitats in the lower portions of slopes and hills, Spruce communities with *Alnus glutinosa* grew in the most humid habitats in hollows and along rivers and creeks. The shores of isolated water bodies were overgrown with the pioneer species *Betula pubescens* and *Alnus incana*.

Gradually isolated water bodies were progressively desalinated, as indicated by diatom complexes consisting of scarce marine species and the complete dominance of the freshwater forms *Fragilaria* sensu lato, *Aulacoseira* sp., *Frustulia saxonica*, *Tabellaria* sp., *Brachysira zellensis*, *Pantocsekiella ocellata*, *Cymbella* sp., *Eunotia* sp., *Gomphonema acuminatum*, *Tetracyclus lacustris*, *Ulnaria ulna*, *Pinnularia* sp., etc. *Nuphar*, *Myriophyllum* and *Sparganium* pollen and *Isoetes* spores occurred in sediments

Late Holocene. Late Holocene climate showed a cooling trend. The scarcity of *Ulmus*, *Quercus* and *Tilia* pollen grains suggests that the boundary of thermophilic plants' distribution area shifted southwards. Sediments are dominated by *Pinus* (50-65%), *Betula* sect. *Albae* (15-20%) and *Picea* (15%) pollen, as indicated by the increasing abundance of club-moss spores in spectra. The contribution of Cyperaceae pollen and

Sphagnum and *Equisetum* spores increases. Forests gradually become thin, acquiring a north-taiga appearance. Spruce continued to contribute markedly to the plant cover, but pine forests were most abundant. About 1500 y.a., the lake, located at an altitude of 10 m above sea level, separated. Marine sediments contain halophyte pollen and marine diatomaceous algae. Overlying strata display the pollen and spores of aquatic and bog species (*Nuphar*, *Nymphaea*, *Sparganium*, *Potamogeton* and *Isoetes*), which indicate the desalination of the lake. The increased contribution of the pioneer species *Betula* sect. *Albae* and *Alnus incana* pollen was due to their invasion of the seawater-free area. The appearance of *Rumex chamaemorus*, *Drosera* and *Menyanthes trifoliata* pollen indicates the paludification of the area.

4. Conclusions

Holocene plant dynamics for the south shore of Kandalaksha Bay was reconstructed. Pine has remained the dominant forest-forming species in the study area since the Early Holocene due to vertically rugged topography, the distinctive features of the bedrock consisting of thin sandy and sandy loam moraine and an abundance of rock exposures. The time of isolation of small water bodies was determined.

Acknowledgements

The study was carried out under a state order to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Project 123082400001-7), Institute of Geology, KRC, RAS.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Cohen K.M., Gibbard P.L. 2019. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500. *Quaternary International* 500: 20–31
- Kolka V.V., Korsakova O.P., Lavrova N.B. et al. 2019. Lithology, Biostratigraphy, and Geochronology of the Late Pleistocene–Holocene Sediments on the Coast of Onega Bay of the White Sea. *Dokl. Earth Sc.* 485: 312–316. DOI: [10.1134/S1028334X19030115](https://doi.org/10.1134/S1028334X19030115)
- Shelekhova T.S., Lobanova N.V., Lavrova N.B. et al. 2021. Paleogeographic conditions of human habitation on the Karelian coast of the White Sea in the Late-Holocene (Chupa Town, Karelia, Russia). *The Holocene*. DOI: [10.1177/09596836211041733](https://doi.org/10.1177/09596836211041733)
- Shelekhova T.S., Lavrova N.B., Lobanova N. V. et al. 2024. Paleogeographical reconstructions of the environment on the Karelian shore of the White Sea (Keret Area, Russia). *The Holocene*. DOI: [10.1177/09596836231211871](https://doi.org/10.1177/09596836231211871)

Эволюция природной среды южного побережья Кандалакшского залива (по данным изучения донных отложений малых озер)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Шелехова Т.С.*, Лаврова Н.Б.

ФИЦ КарНЦ РАН Институт геологии Карельского научного центра РАН, ул. Пушкинская, 11. Петрозаводск, 185910, Карелия, Россия

АННОТАЦИЯ. На основании обобщения данных, полученных при изучении донных отложений комплексом методов (палинологический, радиоуглеродный (^{14}C), реконструированы изменения окружающей среды южного побережья Кандалакшского залива в голоцене. Приведены диатомовые комплексы морской, пресноводной и переходной фаций. Рассмотрены возможности применения пыльцевых индикаторов для диагностики генезиса отложений.

Ключевые слова: голоцен, донные отложения, спорово-пыльцевой анализ, диатомовый анализ, Белое море

Для цитирования: Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б. Эволюция природной среды южного побережья Кандалакшского залива (по данным изучения донных отложений малых озер) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 665-669. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-665

1. Введение

Исследование динамики экосистем прошлого приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью моделирования сценариев условий природной среды. Изменению относительного уровня Белого моря в позднеледниковье и голоцене посвящены многочисленные исследования (Kolka et al., 2019; Shelekhova et al., 2021; 2024). Динамика развития окружающей среды в целом в прибрежной зоне южной части Кандалакшского залива изучена недостаточно. Наиболее полную «летопись» изменения природных обстановок прошлого содержат донные отложения в котловинах малых озер, ранее входивших состав крупных бассейнов. С целью выявления общих тенденций развития окружающей среды выполнено обобщение полученных диатомовых и палинологических данных по разрезам донных отложений малых озер, расположенных на южном берегу Кандалакшского залива.

2. Материалы и методы

Материалом для представленного исследования послужил керн малых озер, расположенные на гипсометрических отметках от 10 до 28 м над уровнем моря. Methods for processing and studying samples by diatom and palynological analysis are described in (Shelekhova et al., 2021). Проведено обобщение и

сопоставление полученных данных и палеогеографических материалов с близкорасположенных территорий. При сопоставлении данных с хронологическими подразделениями голоцена использована периодизация, принятая Международной комиссией по стратиграфии (Cohen and Gibbard, 2019).

3. Результаты и обсуждение

Ранний голоцен. Пыльцевые комплексы характеризуются высоким содержанием пыльцы *Pinus* (максимум 88%). Количество пыльцы *Betula sect. Albae* составляет не более 20-30%. Среди трав преобладает пыльца *Poaceae* и *Syringaceae* (доля каждого таксона колеблется в пределах 5-10%), вклад пыльцы *Artemisia* и *Chenopodiaceae* не превышает 1-2%. Среди споровых преобладают *Polypodiaceae* (менее 1%), на втором месте – *Lycopodiaceae*. Падение базиса эрозии вследствие продолжающегося гляциоизостатического подъема Балтийского щита вызвало снижение уровня грунтовых вод на территории исследования. Все это способствовало активному распространению сосны, которая занимала благоприятные для нее местообитания. На территории исследования были распространены монодоминантные сосновые и березово-сосновые разреженные леса. О редкостойности их свидетельствует присутствие плаунов (*Diphasiastrum alpinum*, *D. complanatum*, *L. pungens*), содержащихся

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: shelekh@krc.karelia.ru (Т.С. Шелехова)

Поступила: 11 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



в отложениях этого времени. Осадконакопление происходило в морском бассейне, на что указывает комплекс диатомовых водорослей *Hyalodiscus* spp., *Grammatophora* spp., *Paralia sulcata*, *Trachyneis aspera*, *Rhabdonema* spp. *Amphora* spp., *Diploneis* spp. и др. *Dimerogramma* spp., *Lyrella* spp., *Melosira nummuloides*, *Talassionema nitzschioides*, *Mastogloia* spp. и др. Об этом же свидетельствует пыльца растений галофитов *Plantago maritima*, *Salicornia herbacea*, *Atriplex nudicaulis*, *Juncaginaceae* (*Triglochin maritima*). Определена пыльца *Asteraceae* (*Aster* type), по мнению авторов принадлежит *Tripolium vulgare*. Этот вид широко представлен в различных растительных сообществах на приливно-отливной зоне Белого моря.

Средний голоцен. Основной особенностью палиноспектров является появление в отложениях пыльцы *Ulmus*, *Tilia*, *Quercus*, *Corylus*. Обогащение спорово-пыльцевых спектров пыльцой, продуцируемой широколиственными деревьями, было возможно в условиях теплого и влажного климата. В связи с тем, что количество пыльцы представителей термофильной древесной растительности незначительно, можно предположить, что она была занесена ветром из более южных районов. Вероятно, северные границы ареалов широколиственных деревьев располагались достаточно близко от изучаемой территории. Доминирующее положение в спектрах занимает *Pinus* (40-70%). Доля *Betula* sect. *Albae* колеблется от 35 до 40 %. Вклад *Picea* увеличивается до 5%, *Alnus* – до 5-7%. В группе трав доминирует пыльца *Poaceae* и *Cyperaceae*. Количество *Lycoperdaceae* уменьшается. В начале среднего голоцена на территории исследования наиболее широко были распространены сосновые и березово-сосновые северотаежные леса. В середине среднего голоцена происходила изоляция озер, первым отделяется озеро, расположенное на отметке 28 м над уровнем моря, затем озеро на отметке 22 м. Этот процесс находит отражение в диатомовых комплексах (переходная зона), которые характеризуются снижением доли солоноватоводных видов до 60-40%, и возрастанием роли пресноводных форм *Fragilaria sensu lato* (*Fragilariforma constricta*, *Pseudostaurosira brevistriata*, *Pseudostaurosira parasitica*, *Staurosira venter*), единичным участием *Discotella stelligera*, *Epithemia* sp., *Navicula radiosa*, *Tabellaria flocculosa*, *Ulnaria ulna* и др. В палиноспектрах наряду с пыльцой галофитов появляется пыльца растений пресноводных водоемов (*Myriophyllum*, *Sparganium*, *Typha*, споры *Isoetes*, водоросли *Pediastrum*).

В палиноспектрах второй половины среднего голоцена возрастает участие пыльцы *Picea* (~15%), *Alnus* (~10%). Согласно выполненным реконструкциям, на изучаемой территории преобладали сосновые среднетаежные леса с рябиной в подлеске. Сосново-еловые леса были приурочены к наиболее благоприятным местообитаниям в нижних частях склонов и возвышенностей, в наиболее влажных местообитаниях в ложбинах, вдоль рек и ручьев встречались еловые сообщества с участием *Alnus glutinosa*. Берега изолированных водоемов

зарастали пионерными породами (*Betula pubescens* и *Alnus incana*).

Постепенно отделившиеся водоемы полностью опреснялись, о чем свидетельствуют диатомовые комплексы, представленные единичным участием морских видов и полным господством пресноводных форм *Fragilaria sensu lato*, *Aulacoseira* sp., *Frustulia saxonica*, *Tabellaria* sp., *Brachysira zellensis*, *Pantocsekiella ocellata*, *Cymbella* sp., *Eunotia* sp., *Gomphonema acuminatum*, *Tetracyclus lacustris*, *Ulnaria ulna*, *Pinnularia* sp. и др. В отложениях встречена пыльца *Nuphar*, *Myriophyllum*, *Sparganium*, споры *Isoetes*.

Поздний голоцен. Климат позднего голоцена характеризовался направленным похолоданием. Определены единичные пыльцевые зерна *Ulmus*, *Quercus*, *Tilia*, что может свидетельствовать о смещении границ ареала распространения термофильных пород к югу. В отложениях преобладает пыльца *Pinus* (50-65%), *Betula* sect. *Albae* (15-20%), *Picea* (15%). Об этом опосредованно свидетельствует увеличение количества спор плаунов в спектрах. Увеличивается вклад пыльцы *Cyperaceae*, спор *Sphagnum*, *Equisetum*. Леса постепенно становятся редкостойными, приобретая северотаежный облик. Ель еще играла значительную роль в растительном покрове, но преимущественное распространение получили сосновые леса. Около 1500 л. н. происходит отделение озера, расположенного на отметке 10 м. В морских отложениях присутствует пыльца растений галофитов и комплекс морских диатомовых водорослей. В вышележающих отложениях появляется пыльца и споры водных и болотных видов (*Nuphar*, *Nymphaea*, *Sparganium*, *Potamogeton*, *Isoetes*), свидетельствующих об опреснении водоема. Увеличивается вклад пыльцы *Betula* sect. *Albae* и *Alnus incana*, что было обусловлено расселением этих пионерных пород на территории, освобожденной от морской воды. Появлением пыльцы *Rumex chamaemorus*, *Drosera*, *Menyanthes trifoliata* свидетельствует о заболачивании территории.

4. Заключение

Для южного побережья Кандалакшского залива выполнена реконструкция динамика растительности в голоцене. На исследуемой территории начиная с раннего голоцена доминирующей лесобразующей породой оставалась сосна. Это было обусловлено высокой вертикальной расчлененностью рельефа, особенностью подстилающих пород, представленных маломощным слоем песчаной и супесчаной морены и большим количеством скальных выходов. Установлено время изоляции малых водоемов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственной темы ИГ Кар НЦ РАН № FMEN-2023-0008 Института геологии КНЦ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

Cohen K.M., Gibbard P.L. 2019. Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years, version 2019 QI-500. *Quaternary International*. 500: 20–31

Kolka V.V., Korsakova O.P., Lavrova N.B. et al. 2019. Lithology, Biostratigraphy, and Geochronology of the Late Pleistocene–Holocene Sediments on the Coast of Onega Bay of the White Sea. *Dokl. Earth Sc.* 485, 312–316 (2019). DOI: [10.1134/S1028334X19030115](https://doi.org/10.1134/S1028334X19030115)

Shelekhova T.S., Lobanova N.V., Lavrova N.B. et al. 2021. Paleogeographic conditions of human habitation on the Karelian coast of the White Sea in the Late-Holocene (Chupa Town, Karelia, Russia). *The Holocene*. DOI: [10.1177/09596836211041733](https://doi.org/10.1177/09596836211041733)

Shelekhova T.S., Lavrova N.B., Lobanova N.V. et al. 2024. Paleogeographical reconstructions of the environment on the Karelian shore of the White Sea (Keret Area, Russia). *The Holocene*. DOI: [10.1177/09596836231211871](https://doi.org/10.1177/09596836231211871)

Reconstruction of the Late Quaternary climate of Oka Plateau (East Sayan) based on sedimentary record from high-mountain freshwater lake

Short communicationLIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYSolotchin P.A.^{1*}, Solotchina E.P.¹, Bezrukova E.V.²,
Shchetnikov A.A.^{2,3}, Zhdanova A.N.¹¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, pr. Koptyuga, 3, Novosibirsk, 630090, Russia²A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Favorskogo str., 1a, Irkutsk, 664033, Russia³Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lermontova str., 128, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. We present the results of a comprehensive study of Holocene sediments from high-mountain Lake Sagan-Nur located in East Sayan. The lake is freshwater and has glacial origin. The sediments have been studied by X-ray diffractometry (XRD), IR spectroscopy, laser grain-size analysis, X-ray fluorescence analysis, AMS (¹⁴C) and ²¹⁰Pb dating. The mineral composition of lake bottom sediments is dominated by phyllosilicates, quartz and feldspars. The method of mathematical modeling of their complex XRD profiles was used for correct identification of layered silicates. It has been established that the structural characteristics and quantitative ratios of these minerals change in response to climate changes in the region. The study of sediments composition and, especially, the precision mineralogical-crystallochemical analysis of layered silicates allowed us to reconstruct the climatic conditions of sedimentation.

Keywords: lacustrine sediments, layered silicates, modeling of XRD patterns, Holocene, paleoclimate, East Sayan

For citation: Solotchin P.A., Solotchina E.P., Bezrukova E.V., Shchetnikov A.A., Zhdanova A.N. Reconstruction of the Late Quaternary climate of Oka Plateau (East Sayan) based on sedimentary record from high-mountain freshwater lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 670-675. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-670](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-670)

1. Introduction

The abrupt changes in the planet's climate and the uncertainty of its forecast even for the near future have led to the fact that the reconstruction of sedimentation conditions in a changing climate has become one of the urgent scientific problems of our time. The main attention in the world practice is paid to the Holocene climate records, since they are extremely important as close analogs of the present and/or as potential analogs of the future climate. The acute shortage of reliable data on the climate of the past is particularly perceived for the internal regions of the huge Asian continent, including the East Sayan mountainous regions. Lacustrine bottom sediments are natural archives that have recorded the history of the development of paleolandscapes and climatic conditions since the end of the Last Glacial Maximum. Academician N.M. Strakhov has repeatedly indicated the leading role of the climatic factor in the formation of continental subaqueous deposits (Strakhov et al., 1954).

*Corresponding author.

E-mail address: paul@igm.nsc.ru (P.A. Solotchin)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

The aim of this work was to reconstruct the Holocene climate in the Oka Plateau of the East Sayan based on the study of the substance composition of sediments, association and crystallochemical characteristics of layered silicates from high-mountain Lake Sagan-Nur. We obtained cores of bottom sediments, carried out comprehensive mineralogical and crystallochemical studies, and identified the stages in evolution of lake basin in which sedimentation occurred under the influence of climatic factors.

2. Materials and methods

Lake Sagan-Nur is located in the central part of the Oka Plateau and is enclosed by mountains up to 1824 m above sea level. The water surface area is about 1 km², the maximum depth is ~ 23 m. The lake is fed mainly by atmospheric precipitation, water runoff is in the Oka River. The climate of the territory of the Oka Plateau is sharply continental. The thickness of the

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



uncovered sedimentary section was 187 cm. Dating of lake sediments was carried out by AMS (^{14}C) method on total organic matter and gamma-spectrometry (^{210}Pb). The radiocarbon data were calibrated, the age of sediments of Lake Sagan-Nur is ~ 8600 cal yrs.

Mineralogical studies of lake bottom sediments were carried out using a combination of methods including X-ray diffraction (XRD), infrared spectroscopy, laser granulometry, scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence analysis (Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research, IGM SB RAS, Novosibirsk). X-ray studies were performed on an ARL X'TRA diffractometer (Cu $K\alpha$ radiation). For the phase analysis, the samples were scanned in the range from 2° to 65° (2θ) with a step of 0.05° and counting time 3 s at each point. A qualitatively new level of studying the layered silicates in multicomponent systems was provided by using an effective method of mathematical modeling of complex XRD patterns (Solotchina, 2009). We analyzed the initial nonfraction samples. Ethylene glycol-saturated samples were scanned in the interval from 2° to 35° (2θ), with the same step of 0.05° , but with a longer scanning time (16 s) at each point. The peaks of nonlayered minerals contained in sample were described by the Pearson VII function.

3. Results and Discussion

The mineral composition of Lake Sagan-Nur bottom sediments is dominated by layered silicates, quartz and feldspars. The complex of layered silicates includes muscovite, illite, chlorite, mixed-layer illite-smectite and chlorite-smectite, as well as kaolinite. The structural characteristics of these minerals and their quantitative ratios are not equal in the different parts of the section and evidently reacted to changes in the environment of the region. It is known that during cold periods physical erosion of rocks is dominant in the catchment, and terrigenous minerals, including muscovite and chlorite, primarily enter the water bodies, while during warm periods, chemical weathering and soil formation processes intensify. The formation of fine-dispersed illites, mixed layer illite-smectites, and chlorite-smectites, and the concentration of smectite layers in them indicate a warm and humid climate.

The results of modeling the XRD patterns of layered silicates indicate an unstable and seasonally dry climate at the end of the Early and at the beginning of the Middle Holocene (8600–7800 cal yrs). In the lower part of the section most of the samples accumulate finely-dispersed clay minerals - illite and illite-smectite. Elevated values of organic matter content up to 20–25% imply favorable conditions for the development of aquatic vegetation. At the same time the high content (up to $\sim 50\%$) of muscovite and small amount of organic matter ($\leq 5\%$) in some samples indicate intermittent cooling periods (Fig. 1, sample 159–160). In the Middle Holocene, climate warming and permafrost degradation occurred. There was also a decrease in the input of terrigenous material. The Late Holocene (past ~ 3000 cal yrs) is characterized by the dominant terrigenous material which is likely to have the coastal

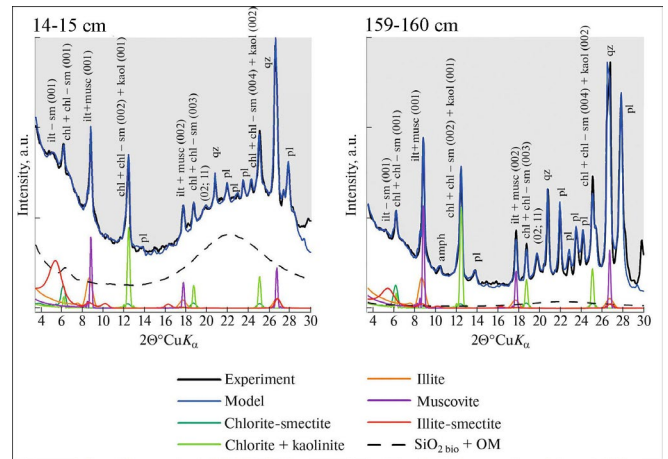


Fig. 1. Results of modeling of XRD patterns of layered silicates in samples from Sagan-Nur Lake. Designations: musc – muscovite, chl – chlorite, ilt – illite, ilt-sm – illite-smectite, chl-sm – chlorite-smectite, kaol – kaolinite, qz – quartz, pl – plagioclase, amph – amphibole, OM – organic matter.

catchment as the main provenance area. Compared to the underlying deposits in the upper horizons of sediments contain a decreasing amount of finely dispersed illite, fewer smectite layers in illite-smectite, and an increased content of muscovite and chlorite, which indicates the colder climate of the Late Holocene. However, some samples (Fig. 1, sample 14–15 cm) were recorded to contain a significant amount of SiO_2bio (up to 15%) and organic matter (up to 20–25%), which may indicate periodic softening of climatic conditions in the Late Holocene.

4. Conclusions

Thus, based on the lithological and mineralogical-crystallochemical studies, the dynamics of changes in landscape-climatic conditions of sediment accumulation in Sagan-Nur Lake was reconstructed. The high potential of a number of phyllosilicates (illite, mixed-layer minerals) as indicators of the paleoclimate in the deposits of freshwater basins was shown. The obtained data confirm the results of the palynological analysis of the bottom sediments of Lake Sagan-Nur, performed earlier using the biomization method (Bezrukova et al., 2022). The comparison of the identified stages of environmental evolution in the lake basin with the subdivisions of the Holocene climate-stratigraphic scale demonstrated their good agreement, which suggested a significant influence of global climatic processes on the regional features of continental sedimentary environments at that time.

Acknowledgements

This work was carried out under State Assignments of the Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, project no. 122041400243-9, and Institute of Geochemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, project no. 0284-2021-0003, and was supported by the Russian Science Foundation, grant no. 23-17-00067.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Bezrukova E.V., Reshetova S.A., Volchatova E.V. et al. 2022. First reconstructions of vegetation and climate changes in the central part of the Oka plateau (East Sayan Mountains)

in the middle-late Holocene. *Doklady Earth Sciences*. 506(1): 687–693. DOI:[10.1134/s10283334x22700064](https://doi.org/10.1134/s10283334x22700064)

Solotchina E.P. 2009. Structural typomorphism of clay minerals in sediments and weathering profiles. Novosibirsk: Geo. (in Russian).

Strakhov N. M., Brodskaya N. G., Knyazeva L. M. et al. 1954. Sedimentation in modern water basins. Moscow: USSR Acad. Sci. (in Russian).

Реконструкция позднечетвертичного климата Окинского плато на основе осадочной летописи высокогорного пресноводного озера (Восточный Саян)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСолотчин П.А.^{1*}, Солотчина Э.П.¹, Безрукова Е.В.²,
Щетников А.А.^{2,3}, Жданова А.Н.¹¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3, Россия²Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия³Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты комплексного исследования голоценовых отложений высокогорного озера Саган-Нур, расположенного на территории Восточного Саяна. Озеро является пресноводным и имеет ледниковое происхождение. Отложения изучались методами рентгеновской дифрактометрии (XRD), ИК-спектроскопии, лазерного гранулометрического анализа, рентгенофлуоресцентного анализа, AMS (¹⁴C) и ²¹⁰Pb датирования. В минеральном составе донных осадков озера преобладают филлосиликаты, кварц и полевые шпаты. Для корректной идентификации слоистых силикатов был использован метод математического моделирования их сложных XRD профилей. Установлено, что структурные характеристики и количественные соотношения этих минералов меняются в зависимости от климатических изменений в регионе. Изучение состава осадков и, особенно, прецизионный минералого-кристаллохимический анализ слоистых силикатов позволили реконструировать климатические обстановки седиментации.

Ключевые слова: озерные осадки, слоистые силикаты, моделирование XRD профилей, голоцен, палеоклимат, Восточный Саян

Для цитирования: Солотчин П.А., Солотчина Э.П., Безрукова Е.В., Щетников А.А., Жданова А.Н. Реконструкция позднечетвертичного климата Окинского плато на основе осадочной летописи высокогорного пресноводного озера (Восточный Саян) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 670-675. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-670

1. Введение

Резкие изменения климата на планете и неопределенность его прогноза даже на ближайшее будущее привели к тому, что реконструкция обстановок осадконакопления в условиях изменяющегося климата стала одной из актуальных научных проблем нашего времени. Основное внимание в мировой практике уделяется летописям климата голоцена, поскольку они исключительно важны как близкие аналоги современности и/или как потенциальные аналоги климата будущего. Острый недостаток достоверных данных о климате прошлого особенно ощущается для внутренних областей огромного Азиатского континента, в том числе для горных районов Восточного Саяна. Естественными архивами, в которых зафиксирована история развития природно-климатических обстановок со

времени окончания последнего ледникового максимума, являются донные отложения озер. На ведущую роль климатического фактора в формировании континентальных субаквальных отложений неоднократно указывал академик Н.М. Страхов (Страхов и др., 1954).

Целью работы являлась реконструкция климата голоцена на территории Окинского плато Восточного Саяна на основе изучения вещественного состава отложений, ассоциации и кристаллохимических характеристик слоистых силикатов высокогорного озера Саган-Нур. Нами был получен керн донных осадков, выполнены их комплексные минералого-кристаллохимические исследования и выделены стадии эволюции бассейна, осадконакопление в котором происходило под влиянием климатических факторов.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: paul@igm.nsc.ru (П.А. Солотчин)

Поступила: 05 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Озеро Саган-Нур расположено в центральной части Окинского плато, в окружении гор высотой до 1824 м над у.м. Площадь водной поверхности составляет около 1 км², максимальная глубина ~ 23 м. Питание озера обеспечивается, в основном, атмосферными осадками, сток воды происходит в р. Ока. Климат территории Окинского плато резко континентальный. Мощность вскрытого осадочного разреза составила 187 см. Датирование озерных отложений выполнено методами AMS (¹⁴C) по общему органическому веществу и гамма-спектрометрией по ²¹⁰Pb. Данные радиоуглеродного анализа были откалиброваны, возраст отложений оз. Саган-Нур составляет ~8600 к.л.

Минералогические исследования донных отложений озера проводились комплексом методов, включающим рентгеновскую дифрактометрию (XRD), ИК-спектроскопию, лазерную гранулометрию, сканирующую электронную микроскопию, рентгенофлуоресцентный анализ (ЦКП многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Рентгеновские исследования выполнены на дифрактометре ARL X'TRA (излучение Cu K_α). Для фазового анализа образцы были отсканированы в интервале от 2° до 65° (2Q) с шагом 0.05°, время сканирования в точке 3 сек. Качественно новый уровень исследований присутствующих в многокомпонентных системах слоистых силикатов обеспечен применением эффективного метода математического моделирования их сложных XRD профилей (Солотчина, 2009). Анализировались исходные нефракционные пробы. Съёмка насыщенных этиленгликолем образцов проводилась в интервале от 2° до 35° (2Q), с тем же шагом 0.05°, но увеличенным временем сканирования в точке - 16 сек. При моделировании рефлексы присутствующих в образце неслоистых минералов описывались функцией Пирсона VII.

3. Результаты и их обсуждение

В минеральном составе донных отложений озера Саган-Нур преобладают слоистые силикаты, кварц и полевые шпаты. Ансамбль слоистых силикатов включает мусковит, иллит, хлорит, смешанослойные иллит-сметтит и хлорит-сметтит, а также каолинит. Структурные характеристики этих минералов и их количественные соотношения различаются в разных частях разреза, и активно реагируют на изменения природной обстановки в регионе. В холодные периоды преобладает физическое выветривание пород водосбора, и в водоемы поступают преимущественно терригенные минералы, в их числе мусковит и хлорит, а в теплые периоды усиливаются процессы химического выветривания и почвообразования. Формирование тонкодисперсных иллитов, смешанослойных иллит-сметтитов и хлорит-сметтитов свидетельствуют о теплом и влажном климате.

Результаты моделирования XRD профилей слоистых силикатов в осадках озера указывают на неустойчивый и сезонно засушливый климат финала раннего и начала среднего голоцена (8600-7800 к.л.н.). В низах разреза накапливаются преимущественно тонкодисперсные глинистые минералы – иллит и иллит-сметтит. Отмечаются повышенные содержания ОБ – до 20-25%, указывающие на расцвет водной растительности. В то же время в ряде образцов отмечается высокое (до ~50%) содержание мусковита и малое ОБ (<= 5%), что свидетельствует о периодических похолоданиях (Рис.1, обр. 159-160 см). В среднем голоцене происходит потепление климата и деградация вечной мерзлоты. Отмечается снижение интенсивности потока терригенного материала при возрастании в нем доли пелитовых фракций. В позднем голоцене (последние ~3000 лет) в осадках озера преобладает терригенный материал, источником которого является прибрежная полоса водосбора, уменьшается содержание тонкодисперсного иллита и смектитовых слоев в иллит-сметтите по сравнению с подстилающими отложениями, а содержание мусковита и хлорита увеличивается, что указывает на более холодный климат позднего голоцена. Тем не менее, в ряде образцов (Рис. 1, обр. 14-15 см) установлено значительное количество SiO₂bio (до 15%) и ОБ (до 20-25%), что может свидетельствовать о периодическом смягчении климата в позднем голоцене.

4. Заключение

Таким образом, на основе проведенных литологических и минералого-кристаллохимических исследований реконструирована динамика изменений ландшафтно-климатических условий осадконакопления в оз. Саган-Нур. Показан высокий потенциал ряда филлосиликатов (иллит, смешанослойные минералы) как индикаторов палеоклимата в отложениях пресноводных бассейнов. Полученные данные подтверждают результаты

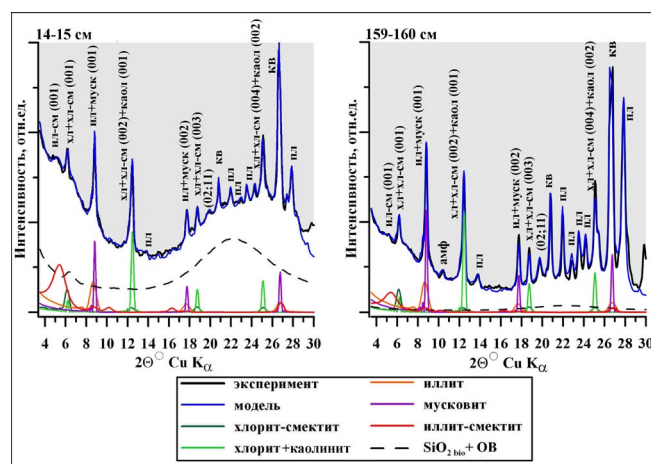


Рис.1. Результаты моделирования XRD профилей слоистых силикатов в образцах оз. Саган-Нур. Обозначения: муск – мусковит, хл – хлорит, ил – иллит, ил-см – иллит-сметтит, хл-см – хлорит-сметтит, каол – каолинит, кв – кварц, пл – плагиоклаз, амф – амфибол.

палинологического анализа донных отложений оз. Саган-Нур, выполненного ранее с помощью метода биомизации (Безрукова и др., 2022). Сопоставление выделенных стадий эволюции природной среды в бассейне озера с подразделениями климатостратиграфической шкалы голоцена показало их хорошее соответствие, что свидетельствует о значительном влиянии глобальных климатических процессов на региональные особенности обстановок осадконакопления в это время.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН, проект № 122041400243-9 и ИГХ СО РАН, проект № 0284-2021-0003, а также за счет средств Российского научного фонда, грант № 23-17-00067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Безрукова Е.В., Решетова С.А., Волчатова Е.В., Кузьмин М.И. 2022. Первые реконструкции ландшафтно-климатических изменений в центральной части Окинского плато (Восточный Саян) в среднем-позднем голоцене. Доклады Академии Наук. 506(1): 104–110.

Солотчина Э.П. 2009. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео».

Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М. и др. 1954. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР.

Reconstruction of changes in sedimentation conditions of lakes of the Barents Sea coast during their isolation from the sea in the Holocene (Mustatunturi Ridge, Kola region)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYShikhirina K.A.^{1,*}, Tolstobrov D.S.²¹Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika Embankment, St. Petersburg, 191186, Russia²Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 14 Fersmana Str., Apatity, 184209, Russia

ABSTRACT. In this short communication presented a reconstruction of the isolation process of 4 lakes located on the coast of the Barents Sea (Musta-Tunturi ridge). The reconstruction was carried out on the basis of a lithological description of lakes' bottom sediments, interpreted as transition zone sediments from marine to lake sedimentation conditions. The lithological description was compiled based on the results of grain-size and LOI (losses on ignition) analyses of 4 lakes' bottom sediments and its radiocarbon dating. An assumption about the role of tectonic and climatic factors in the isolation of lake basins was made.

Keywords: bottom sediments of lakes, sea level change, Barents Sea, Late Glacial, Holocene

For citation: Shikhirina K.A., Tolstobrov D.S. Reconstruction of changes in sedimentation conditions of lakes of the Barents Sea coast during their isolation from the sea in the Holocene (Mustatunturi Ridge, Kola region) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 676-683. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-676

1. Introduction

One of the paleogeographic research methods is studying the development of lake basins, the bottom sediments of which could be a source of information about the conditions of their formation. In recent years, the isolated basins method proposed by Scandinavian scientists (Donner et al., 1977) has been used to determine the nature of bottom sediments formation conditions in lake basins formed as a result of sea regression. The method is based on determining the spatial and temporal position of the insulating contact – the transition zone from the sea to the freshwater lake, in the columns of bottom sediments from the basins of lakes. The territory of the northeast of the Fennoscandian Shield is a classic area for studying changes in the position of the sea coastline associated with neotectonic movements of the Earth's crust. Late Glaciation Ice Sheet (Ramsai, 1898) caused the uplift of the territory during the Late Pleistocene and Holocene, and continues today, albeit at a much lower rate and with a gradually decreasing trend (Lavrova, 1960). Such works were carried out on the Barents Sea coast of the Kola region in the areas of the village Dalnie Zelentsy (Snyder et al., 1997), Nickel (Corner et al., 1999) and Polyarny (Corner et al.,

2001), in the valley of the Tuloma River (Tolstobrov et al., 2015; 2016), as well as on the White Sea coast of the Kola Peninsula and Karelia (Kolka et al., 2013; 2014; 2015). At the same time, there remain areas of the Barents Sea Murmansk coast for which there is no data. Lithology was described in the previous abstract about first results of this work (Tolstobrov et al., 2021), some other results of this research were also presented in 3 previous papers (Tolstobrov et al., 2021; 2023; Shikhirina et al., 2022).

2. Materials and methods

In July 2021 the expedition took place and bottom sediments of 8 lakes located on elevations 11.0-83.5 m were sampled. Four of them that have been chosen to be analyzed on LOI and grain-size are located on elevations: SR-1 (11.0 m), SR-5.2 (27.0 m), SR-2 (31.2 m) and SR-7.2 (83.5 m). The radiocarbon dating was proceeded.

Both analyses were performed according to the standard methodology (GOST 17.4.4.02-84) in the laboratory of Rational Environmental Management of the Faculty of Geography of Herzen University. To perform

*Corresponding author.

E-mail address: kristinashikhirinaa@gmail.com (K. Shikhirina)

Received: June 11, 2024; **Accepted:** July 05, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



the LOI analysis, the samples were ignited at 550°C, prepared and weighted before and after the ignition to count the losses of weight. It is interpreted as the loss of organic matter (Meyers and Teranes, 1999). After comparison of different methods, the Estonian one was chosen (Vaasma, 2008): every sample was mixed with 40% hydrogen peroxide and heated up to 80°C until the reaction stopped. Grain-size analysis was performed using LaSca-1C Laser Particle Size Analyzer. The fractions were determined according to Kachinsky (Kachinsky, 1965).

3. Results and discussion

SR-7.2 (83.5 m). Gravel and other large particles of slightly smaller dimensions are found in the upper part of facies I, which can be a marker of seismic activity during the isolation period and possibly indicates the leading role of the tectonic factor in the lake isolation. Facies II is a transition zone from the marine to the lake type of sedimentation: siltstone sediments are changing to gyttja, this is a zone of the smallest average diameters with a dominance of fine-powdered and medium-powdered particles. It is characterized by the upward increase in the organic matter content from 4% in facies I to 30% with the smallest average particle diameter throughout the core and the dominance of medium dust particles in the fractional distribution (in the absence of larger particles). These characteristics of the facies indicate the lake water level increase and sedimentation conditions of deeper lake with a dominance of coarse remnants of higher plants in the organic part of the sediment, as indicated by the brown color and its olive tint of the gyttja. The dating of the sediment of the transition zone had not yet been performed. In the lower part of facies III with a higher content of organic matter, there is an obscure layering, indicating a frequent climate warming and cooling periods changings.

SR-2 (31.2 m). The boundary between the marine sediments facies (I) and the facies of the transition zone sediments (II) is smooth, probably the isolation from the sea occurred quickly, but not abruptly. Facies II is only 2 cm of 1.81 cm uncovered sediments in this lake. According to the petrographic description it consists of sand with a brown gyttja (with a yellowish tint). Grain-size analysis revealed the following particle ratio: 33.50% (fine dust), 25.87% (medium dust) 34.81% (coarse dust), 15.77% (fine sand) and 4.11% (medium sand). The formation of the facies occurred in the early Preboreal: radiocarbon dating of the higher sediments confirmed an age of 10930 ± 140 cal. years.

SR-5.2 (27.0 m). During the Holocene the lake went through isolation stage twice. The transition between the horizon of facies I and II is sharp, which indicates the nature of the isolation. Due to the lack of dating, now it can only be assumed that this event belongs to the Preboreal period and occurred no earlier than 10930 ± 140 cal. years ago, when lake SR-2 located 4 meters above was isolated. The transition zone of the lake SR-2 sediments is thin; it can be assumed that the isolation of lake SR-5 occurred faster. However, it is difficult to prove the cause: was it caused

by the uplift of this area or the sea level lowering itself. The sharp boundary between lake and marine sediments probably associated with the Middle Holocene transgression Tapes (Tolstobrov et al., 2021; Tolstobrov et al., 2023). The lower layer of marine sediments contains inclusions of gravel, crushed stone and pebbles up to 3x1.5 cm, wood remains and other undecayed plants remains. The characteristics of the boundary and the inclusions observed indicate a sharp sedimentation conditions change. This change was caused or correlated with a catastrophic event that led to accumulation of coarse-grained material at the bottom of the lake. It can be assumed that this event was the Storegga tsunami in the Middle Holocene (Bondevik et al., 1997), which revealed in this lake sediments more clear than in lake SR-2 sediments. The horizon is characterized by a low content of organic matter and a dominance of silt in the grain-size composition with large inclusions. Facies II, which lies above marine sediments, is a loose dark brown gyttja with sand filled with plant remains. The containment of organic matter increases significantly up the horizon (from 30 to 47%), fine dust and silt particles dominate in the grain-size composition (70-80% in total). The dark color indicates a significant dominance of coarse detritus over fine detritus. Probably, during this period the lake was not completely isolated from the sea, which could explain the accumulation of plant remains due to the wash. The approximate age of the sediment can be assumed by comparing the petrographic description of this core and the other one sampled in this lake. Radiocarbon showed about 7.500 cal. years, which indicates the horizon formation occurred later the Tapes transgression reached its peak. Excluding the factors that could potentially affect the radiocarbon dating the glacial isostatic adjustment as the isolation cause could be assumed. Probably the lake level also got lower during this period. Nevertheless, due to the lack of radiocarbon dating for the samples of this core now it is only possible to assume that the first isolation of the lake in the Holocene occurred in the Boreal period. In the Atlantic period the lake basin was a part of the sea bottom because the Tapes transgression. After the sea regression during the Subboreal and Subatlantic periods the lake conditions became the same as it could be observed today.

SR-1 (11.0 m). Facies II (10 cm of 90 cm uncovered sediments) represents a transition zone from marine sedimentation conditions to lake conditions. The boundary between this and the lower facies is sharp, which indicates a relatively high rate of isolation. The formation of the higher part of this facies occurred 4830 ± 150 cal. years ago, at the beginning of the Subboreal, a warmer period relative to today's conditions, but characterized by a cooling trend. Probably, the isolation of the lake occurred during the period of the Holocene Climate Optimum. This is also proved by the organic matter containment getting higher from 12% in marine sediments to 25%. The sediments are consisting of layered gyttja with silt. The mineral part of the sediment is characterized by an abrupt increase in the average particle size (from 7 to 15 μm), coarse dust significantly prevails over fine dust, which was

characteristic of the marine sediment facies. Such a change in the fractional distribution of particles size indicates a change in pelagic conditions to littoral ones. The boundary between the precipitation facies of the transition zone and the overlying facies of gyttja is smooth, indicating the smooth desalination of the lake and the establishment of freshwater lake conditions. In the lower part of the facies, plant remains are observed.

4. Conclusion

In all four lakes were uncovered not only lake but also marine genesis sediments. According to the results of radiocarbon dating, the lake located 31.2 meters above sea level, passed through isolation stage in the early Holocene (10930 ± 140 cal. years ago). In this and two other lakes located below, the deepest uncovered marine sediments consist of gray sand, but the higher located SR-7.2 (83.5 m) deepest marine sediments consist of clay with sand and siltstone of gray color with a blue tint, which allows to make an assumption about the periglacial conditions of its formations. The sediment formation and isolation of the lake probably occurred in the Late Pleistocene. Lake SR-5.2 passed through the isolation stage in the Preboreal period, but SR-1 at the end of the Subboreal period. It was suggested that the role of tectonic and climatic factors in the isolation of the studied lake basins: SR-7.2 isolation could be caused by the glacial isostatic adjustment, as indicated by the results of grain-size analysis. The petrographic description suggests a correlation between the isolation of SR-1 and lowering of the Barents Sea level during the climatic cooling at the boundary of the Subboreal and the Subatlantic periods.

Acknowledgements

Authors appreciate Pronina A. V, Kostromina N. A., Nikolaeva S. B., Koroleva A. O., Komarov A. O. and Staforkin A. A. for the field work assistance.

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education of Russia (projects no. 073-03-2022-040/2 and no. 073-03-2023-049/3).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Bondevik S., Svendsen J.I., Mangerud J. 1997. Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegg tsunami in shallow sea basins and coastal lakes of western Norway. *Sedimentology* 44: 1115-1131. DOI: [10.1046/j.1365-3091.1997.d01-63.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-63.x)
- Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.Ya. et al. 2001. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. *Global and Planetary Change* 31: 153-175.
- Corner G.D., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. et al. 1999. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. *Boreas* 28(1): 146-166. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x)
- Donner J., Eronen M., Jungner H. 1977. The dating of the Holocene relative sealevel changes in Finnmark, North Norway. *Norsk geografisk Tidsskrift [Norwegian Journal of Geography]* 31: 103-128.
- Kachinsky N.A. 1965. *Physics of soils*. Higher School. Part 1. (in Russian)
- Kolka V.V., Evzerov V.Ya., Meller Ya.Y. et al. 2013. Sea level movement in the Late Pleistocene-Holocene and stratigraphy of bottom sediments of isolated lakes on the southern shore of the Kola Peninsula, near the village of Umba. *Izvestia Rossiiskoi Akademii Nauk. Seria Geographicheskaya [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]* 1: 73-88. (in Russian)
- Kolka V.V., Korsakova O.P., Shelekhova T.S. et al. 2014. The temporal sequence of the White Sea coastline movement in the Holocene according to the study of bottom sediments of lakes in the Kuzema region (North Karelia). *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva [Proceedings of the Russian Geographical Society]* 146(6): 14-26. (in Russian)
- Kolka V.V., Korsakova O.P., Shelekhova T.S. et al. 2015. Restoration of the relative position of the White Sea level in the Late Glacial and Holocene according to lithological, diatom analyses and radiocarbon dating of bottom sediments of small lakes in the area of the village. Chupa (North Karelia). *Vestnik MSTU [Herald of the Murmansk State Technical University]* 18(2): 255-268. (in Russian)
- Lavrova M.A. 1960. *Quaternary geology of the Kola Peninsula*. Publishing House of the USSR Academy of Sciences.
- Meyers P. A., Teranes J. L. 1999. *Sediment organic matter. Tracking environmental changes using lake sediments: Vol. 2: Physical and geochemical methods*. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers. 239-269.
- Ramsai W. 1898. About the geological development of the Kola Peninsula in the Quarter. *Fennia* (in German)
- Shikhirina K.A., Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N. 2022. Barents Sea coastline dynamics in the Holocene in the Kola region: grain-size and LOI analyses of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1583-1585.
- Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N. et al. 1997. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas* 26: 329-346.
- Tolstobrov D.S., Kolka V.V., Tolstobrova A.N. et al. 2016. The experience of chronological correlation of coastal relief forms of the Holocene sea in the depression of the Tuloma River and the Kola Bay. *Vestnik MSTU [Herald of the Murmansk State Technical University]* 19 (1/1): 142-150. (in Russian)
- Tolstobrov D.S., Nikolaeva S.B., Tolstobrova A.N. et al. 2021. Lithology of bottom sediments of lakes on the Murmansk coast of the Barents Sea (the area of the Mustatunturi ridge and the Sredny Peninsula, Murmansk region). In: *Annual Conference on the Results of Expeditionary Research "Rel'yef i chetvertichnyye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii [Relief and Quaternary Formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia]"*, pp. 235-239. (in Russian)
- Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Kolka V.V. et al. 2015. Postglacial uplift of the Earth's crust in the northwestern part of the Kola region. *Vestnik MSTU [Herald of the Murmansk State Technical University]* 18(2): 295-306. (in Russian)
- Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Kolka V.V. et al. 2018. Possible traces of Holocene tsunamis in lake bottom sediments near the village. Teriberka (Kola Peninsula, Russia). *Trudy KarSC RAS (9) Ser. Limnologia. Okeanographia*. 92-102. (in Russian)
- Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Shikhirina K.A. 2023. Preliminary data on changes in the Barents Sea level in the area of the Mustatunturi Ridge, northwest of the Murmansk

region. Proceedings of the Fersman scientific session of the
GI KSC RAS 20: 211–217. DOI: [10.31241/FNS.2023.20.026](https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.026).
(in Russian)

Vaasma T. 2008. Granulometric analysis of lake sediments: comparison of pretreatment methods. *Estonian Environmental Journal* 57(4).

Реконструкция изменений условий осадконакопления озер побережья Баренцева моря в период их изоляции от моря в голоцене (хребет Мустатунтури, Кольский регион)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYШирина К.А.^{1*}, Толстобров Д.С.²¹РГПУ им. А.И. Герцена Санкт-Петербург, наб. реки Мойки 48, 191186, Россия²ГИ КНЦ РАН Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана 14, 184209, Россия

АННОТАЦИЯ. В данном кратком сообщении приводится реконструкция процесса изоляции 4-х озер, расположенных на побережье Баренцева моря в окрестностях хребта Мустатунтури. Реконструкция выполнялась на основе литологического описания горизонтов донных осадков озера, интерпретируемых как фация осадков переходной зоны от морских условий осадконакопления к озерным. Литологическое описание было составлено по результатам гранулометрического анализа, анализа потерь массы вещества при прокаливании и радиоуглеродного датирования. Выдвинуты предположения о роли тектонического и климатического факторов в изоляции озерных бассейнов.

Ключевые слова: донные отложения озер, изменения уровня моря, Баренцево море, Валдайское оледенение, голоцен

Для цитирования: Ширина К.А., Толстобров Д.С. Реконструкция изменений условий осадконакопления озер побережья Баренцева моря в период их изоляции от моря в голоцене (хребет Мустатунтури, Кольский регион) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 676-683. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-676](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-676)

1. Введение

Одним из методов палеогеографических исследований является изучение развития озерных бассейнов, донные отложения которых представляют собой источник информации об условиях их формирования. Метод изолированных бассейнов (Donner et al., 1977), использованный в данной работе, предполагает изучение развития береговой линии морей путем реконструкции условий формирования донных отложений в озерных бассейнах, сформировавшихся в результате регрессии моря. Таким образом, трансгрессивно-регрессивные процессы моря могут быть реконструированы посредством изучения седиментогенеза в озерных бассейнах, прошедших через стадию изоляции от акватории морского бассейна. Территория северо-востока Фенноскандии является классической областью для изучения изменений положения морской береговой линии, связанных с неотектоническими движениями земной коры. Валдайское покровное оледенение, покрывающее данную территорию в эпоху плейстоцена (Ramsai, 1898), стало

причиной гляциоизостатического поднятия территории в позднем плейстоцене и голоцене, продолжающегося и сегодня, но со значительно меньшей и постепенно снижающейся скоростью (Лаврова, 1960). Похожие работы для мурманского берега Баренцева моря проводились в окрестностях поселка Дальние Зеленцы (Snyder et al., 1997), Никель (Corner et al., 1999) и Полярный (Corner et al., 2001), в долине реки Тулома (Толстобров и др., 2015; 2016), а также на побережье Белого Моря (Колька и др., 2013; 2014; 2015). Однако, остается не до конца изученной значительная западная часть мурманского берега Баренцева моря. Литология исследуемых в данной работе колонок донных осадков была описана ранее (Толстобров и др., 2021), некоторые результаты этого исследования также были частично представлены в 3 статьях (Толстобров и др., 2021; 2023; Shikhirina et al., 2022).

2. Материалы и методы

Полевые работы проводились в июле 2021 года. Отобраны колонки донных осадков в 8 озерных

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: kristinashikhirinaa@gmail.com (К.А. Ширина)

Поступила: 11 июня 2024; Принята: 05 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



котловинах, расположенных на высотных отметках от 11,0 до 83,5 метров над современным уровнем моря. Четыре из восьми колонок донных отложений были выбраны как наиболее репрезентативные для проведения гранулометрического анализа, а также анализа потерь массы вещества при прокаливании (ППП). Таким образом, в качестве объектов были выбраны безымянные озера с рабочими названиями: СР-1 (11,0 м), СР-5.2 (27,0 м), СР-2 (31,2 м) и СР-7.2 (83,5 м). Проведено радиоуглеродное датирование выбранных горизонтов колонок СР-1, СР-2 и СР-7.2.

Анализы были выполнены по стандартной методике (ГОСТ 17.4.4.02-84) в научно-исследовательской лаборатории «Рационального природопользования» факультета географии РГПУ им. А. И. Герцена. Анализ ППП проводился по следующей методике: образцы просушивались при 105° С, растирались в керамической ступе, взвешивались, прокаливались при 550° С, повторно взвешивались. Рассчитанная массовая доля вещества, потерянная при прокаливании, интерпретировалась как доля органического вещества в пробе (Meyers and Teranes, 1999). Для гранулометрического анализа был выбран метод лазерной дифракции с использованием лазерного анализатора LaSca-1С. Пробоподготовка осуществлялась по методике Т. Vaasma (Vaasma, 2008): к пробам был добавлен 40% пероксид водорода, затем пробы нагревались до 80° С, по мере испарения оксида углерода пероксид водорода добавлялся до завершения активной реакции. Фракции минеральной части осадка определялись согласно классификации Н. А. Качинского (Качинский, 1965).

3. Результаты и обсуждение

СР-7.2 (83,5 м). В верхней части фации I встречается гравий и другие крупные частицы несколько меньшей размерности, которые могут быть маркером сейсмической активности в период изоляции и, возможно, таким образом указывать на ведущую роль именно тектонического фактора в изоляции данного озера от морской акватории. Фация II представляет собой переходную зону от морского к озерному типу осадконакопления: алевроитовые осадки постепенно сменяются гиттиевыми, в данной части разреза выделяется зона наименьших средних диаметров с преобладанием мелкопылеватых и среднепылеватых частиц. Характеризуется резким ростом вверх по разрезу содержания органического вещества от 4% в фации I до 30% в совокупности с наименьшим средним диаметром частиц по всему разрезу и преобладанием во фракционном распределении среднепылеватых частиц (при отсутствии более крупных частиц). Данные характеристики фации указывают на подъем уровня воды в озере и более глубоководные условия осадконакопления с преобладанием в органической части осадка именно грубого детрита – остатков высших растений, на что указывает коричневый цвет и его оливковый оттенок гиттии. На момент написания

работы еще не было выполнено датирование осадка переходной зоны. В нижней части фации III с более высоким содержанием ОВ отмечается неясная слоистость, указывающая на частую смену периодов потепления и похолодания.

СР-2 (31,2 м). Граница между фацией морских осадков (I) и фацией осадков переходной зоны (II) плавная, вероятно, изоляция от моря произошла быстро, но не резко. Фация II крайне мало мощная, 2 см при мощности вскрытых осадков в 1,81 см, по петрографическому описанию песок с коричневой гиттией с желтоватым оттенком. Гранулометрический анализ показал следующее соотношение частиц: 33,50% (мелкая пыль), 25,87% (средняя пыль) 34,81% (крупная пыль), 15,77% (мелкий песок) 4,11% (средний песок). Формирование фации произошло в раннем пребореале: радиоуглеродный анализ вышележащего осадка показал возраст 10930 ± 140 кал. лет.

СР-5.2 (27,0 м). В течение голоцена озеро проходило процесс изоляции от акватории моря дважды. Переход между горизонтом фации I и II резкий, что указывает на соответствующий характер изоляции. В силу отсутствия датировки, на данном этапе можно только предположить, что данное событие относится к пребореальному периоду и произошло не ранее 10930 ± 140 кал. лет назад, когда прошло стадию изоляции озеро СР-2, расположенное на 4 метра выше. Учитывая наличие маломощной переходной зоны в озере СР-2, можно предположить, что процесс изоляции озера СР-5 происходил быстрее, однако, сказать, было это вызвано поднятием данного участка или же понижением уровня самого моря, затруднительно. Граница между озерными осадками и морскими осадками, вероятно, среднеголоценовой трансгрессии Тапес (Толстобров и др., 2021; Толстобров и др., 2023) неровная, нижний слой морских осадков содержит включения гравия, щебня и гальки до $3 \times 1,5$ см, фрагменты древесины и другие неразложившиеся остатки высшей растительности. Такой характер границы и включения указывают на резкую смену условий седиментогенеза, вызванную (или коррелирующую с катастрофическим событием, которое обусловило аккумуляцию грубообломочного материала в котловине озера. Можно предположить, что этим событием стало цунами Стурегга, проявившееся в данном озере сравнительно больше (Bondevik et al., 1997), чем в осадках озера СР-2. Характеризуется горизонт малым содержанием органического вещества и преобладанием в гранулометрическом составе илистой фракции, если не учитывать редкие, но крупные включения. Фация II, залегающая выше морских осадков, это наполненная растительными осадками рыхлая темно-коричневая гиттия с песком. Доля органического вещества значительно возрастает вверх по горизонту (с 30 до 47%), в гранулометрическом составе доминируют мелкопылеватые и илистые частицы (70-80% суммарно). Темный цвет указывает, однако, на значительное преобладание грубого детрита над тонким. Вероятно, в этот период озеро не было окончательно изолировано от

моря, что могло бы объяснить аккумуляцию остатков высшей водной растительности вследствие приобия. Приблизительный возраст осадка при сопоставлении по петрографическому описанию с другой колонкой, отобранной в данном озере, но для которой было выполнено датирование (около 7500 кал. лет назад), указывает нам на то, что формирование горизонта произошло позже того момента, как трансгрессия Тапес достигла своего пика: если исключить факторы, которые потенциально могли бы повлиять на определение возраста, то можно сделать предположение о тектонической причине изоляции бассейна от акватории моря. Возможно, в этот период уровень озера также понизился. Тем не менее, в силу отсутствия корректных датировок проб данной колонки, на данном этапе возможно лишь предположить, что первая в голоцене изоляция озера произошла в бореальном периоде, затем в атлантическом озере вновь стало частью акватории моря, испытав влияние трансгрессии Тапес, а после регрессии моря тогда же стало стабилизироваться. В течение суббореального и субатлантического периодов озеро оставалось практически в том же состоянии, что наблюдается сегодня.

СР-1 (11,0 м). Фашия II (мощностью 10 см при мощности вскрытых осадков в 90 см) представляет собой переходную зону от морских условий осадконакопления к озерным и генетически занимает промежуточное положение. Граница между ней и низелеалегающей фашией резкая, что указывает на сравнительно высокую скорость изоляции от моря. Формирование наиболее высоко залегающей части фашии произошло 4830 ± 150 кал. лет назад, в начале суббореала, более теплое по отношению к сегодняшним условиям периода, однако характеризующегося трендом к похолоданию. Вероятно, изоляция озера произошла в период среднеголоценового климатического оптимума. На это также указывает доли органического вещества вверх по разрезу с 12% в морских осадках до 25%. Осадки представлены слоистой гиттией с алевроитом. Минеральная часть осадка характеризуется скачкообразным ростом среднего диаметра частиц (от 7 до 15 мкм), крупная пыль значительно преобладает над мелкой, что было характерно для фашии морского осадка. Такой изменение фракционного распределения частиц указывает на смену пелагиальных условий литоральными. Граница между фашией осадков переходной зоны и вышезалегающей фашией органогенных гиттиевых осадков постепенная, свидетельствующая о постепенном опреснении водоема и установлению пресноводных озерных условий. В нижней части фашии отмечаются растительные макроостатки.

4. Выводы

Во всех четырех озерах удалось вскрыть осадки не только озерного, но и морского генезиса. По результатам радиоуглеродного анализа озеро, расположенное на 31,2 метрах над современным уровнем моря, прошло стадию изоляции в раннем

голоцене 10930 ± 140 кал. лет назад. В данном и еще двух озерах, расположенных ниже, наиболее глубоко залегающие морские осадки представлены серым песком, однако, наиболее высоко расположенное СР-7.2 (83,5 м) отличается тем, что его наиболее глубоко залегающий горизонт представлен глиной с песком и алевроитом серого цвета с синим оттенком, что позволяет сделать предположение о перигляциальных условиях его формирования. Вероятно, формирование осадка и изоляция озера относятся к позднему плейстоцену. Озеро СР-5.2 прошло стадию изоляции в пребореальном периоде, СР-1 в конце суббореального. Было выдвинуто предположение о роли тектонического и климатического факторов в изоляции изученных озерных котловин. Изоляция СР-7.2 могла быть вызвана гляциоизостатическим поднятием, на что указывают результаты гранулометрического анализа. Петрографическое описание позволяет предположить связь изоляции СР-1 с происходившим на границе суббореала и субатлантика похолоданием и снижением уровня Баренцева моря.

Благодарности

Авторы выражают благодарность участникам полевых работ: А. В. Прониной, Н. А. Костроминой, С. Б. Николаевой, А. О. Королевой, А. О. Комарову, А. А. Стафоркину.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства просвещения РФ в рамках реализации государственных заданий РФ № 073-03-2022-040/2 (проект «Палеогеография, развитие гидрографической сети и динамика уровней бассейнов на периферии Фенноскандинавского щита в позднем плейстоцене и голоцене») и № 073-03-2023-049/3 (проект «Эволюция озерного осадконакопления в условиях меняющегося климата: позднелейстоценовое и современное озерное осадконакопление в гляциальных и перигляциальных условиях (по данным из озер полярных регионов (Антарктика и Арктика) и озер Восточно-Европейской равнины»).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Качинский Н. А. 1965. Физика почв. М.: Высшая школа. Ч. 1. 324 с.
- Колька В.В., Евзеров В.Я., Меллер Я.И. и др. 2013. Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене-голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба. Известия РАН. Серия Географическая (1): 73–88.
- Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. 2014. Временная последовательность перемещения береговой линии Белого моря в голоцене по данным изучения донных отложений озер района Кузема (Северная Карелия).

Известия РГО 146 (6): 14–26.

Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. 2015. Восстановление относительного положения уровня Белого моря в позднеледниковье и голоцене по данным литологического, диатомового анализов и радиоуглеродного датирования донных отложений малых озер в районе пос. Чупа (северная Карелия). Вестник МГТУ 18 (2): 255–268.

Лаврова М.А. 1960. Четвертичная геология Кольского полуострова. Л.: Издво АН СССР. 234 с.

Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Шихирина К.А. 2023. Предварительные данные об изменении уровня Баренцева моря в районе хребта Мустатунтури, северо-запад Мурманской области. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН (20): 211–217.

Толстобров Д.С., Колька В.В., Толстоброва А.Н. и др. 2016. Опыт хронологической корреляции береговых форм рельефа голоценового моря в депрессии реки Тулома и Кольском заливе. Вестник МГТУ 19 (1/1):142–150.

Толстобров Д.С., Николаева С.Б., Толстоброва А.Н. и др. 2021. Литология донных отложений озер на мурманском побережье Баренцева моря (район хребта Мустатунтури и полуострова Средний, Мурманская область). Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России 8: 235–239.

Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Колька В.В. и др. 2015. Постледниковое поднятие земной коры в северо-западной части Кольского региона. Вестник МГТУ 18 (2): 295–306.

Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Колька В.В. и др. 2018. Возможные следы голоценовых цунами в озёрных донных отложениях в районе пос. Териберка (Кольский полуостров, Россия). Труды КарНЦ РАН. Серия Лимнология. Океанология (9): 92–102.

Bondevik S., Svendsen J.I., Mangerud J. 1997. Tsunami

sedimentary facies deposited by the Storegg tsunami in shallow sea basins and coastal lakes of western Norway. *Sedimentology* 44: 1115–1131. DOI: [10.1046/j.1365-3091.1997.d01-63.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-63.x)

Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.Ya. et al. 2001. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. *Global and Planetary Change* 31: 153–175.

Corner G.D., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. et al. 1999. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. *Boreas* 28(1): 146–166. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x)

Donner J., Eronen M., Jungner H. 1977. The dating of the Holocene relative sealevel changes in Finnmark, North Norway. *Norsk geografisk Tidsskrift. [Norwegian Journal of Geography]* 31: 103–128.

Meyers P. A., Teranes J. L. 1999. Sediment organic matter. Tracking environmental changes using lake sediments: Vol. 2: Physical and geochemical methods. Dordrecht–Boston–London: Kluwer Academic Publishers. 239–269.

Ramsai W. 1898. About the geological development of the Kola Peninsula in the Quarterarz. *Fennia* (in German)

Shikhirina K. A., Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N. 2022. Barents Sea coastline dynamics in the Holocene in the Kola region: grain-size and LOI analyses of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1583–1585.

Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N. et al. 1997. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas* 26: 329–346.

Vaasma T. 2008. Granulometric analysis of lake sediments: comparison of pretreatment methods. *Estonian Environmental Journal* 57(4).

Early Holocene transgression in the central of Svalbard: research results and problems of reconstruction

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYSoloveva D.A.^{1*}, Okunev A.S.², Kupriyanova N.V.²¹ Arctic and Antarctic Research Institute, Beringa Str., 38, Saint-Petersburg, 199397, Russia² FSBI «VNIIOKEANGEOLGIA», Angliyskiy av., 1, Saint-Petersburg, 190121, Russia

ABSTRACT. The report presents the results of the study of Holocene marine sediments and terrace levels in the central part of West Spitsbergen Island. The results of the study showed that the postglacial transgression in the study area reached marks of 30-35 m and 40-45 m in the north and south of the study area, respectively. The early Holocene marine sediments were formed in shallow-water, predominantly ice-sea conditions with an unstable coastline. The sea level retreat was rapid and was accompanied by a general cooling.

Keywords: Svalbard, Quaternary deposits, Holocene, sea level changes

For citation: Soloveva D.A., Okunev A.S., Kupriyanova N.V. Early Holocene transgression in the central of Svalbard: research results and problems of reconstruction // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 684-689. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-684

1. Introduction

Deglaciation of the Svalbard was accompanied by a eustatic rise in sea level (Fairbanks, 1989). The rate of glacioisostatic uplift exceeded this rate, which led to a gradual decrease in level (Forman et al., 2004). The main source of data on the position of the coastline in the late Pleistocene - Holocene on the archipelago are marine terraces and the results of age determination of mollusk shells and bones remains of marine mammals (Feyling-Hanssen, 1955; Forman et al., 2004; etc.), collected in terrestrial sections of Quaternary deposits and on the surfaces of terraces (Forman, 1990; Bondevik et al., 1995). Over the past 60 years, postglacial sea level change curves have been constructed for most areas of Spitsbergen (Forman et al., 2004; Sharin et al., 2014, etc.).

When reconstructing sea level, the authors mainly operate with the thesis that sea level change depended primarily on the thickness of the ice sheet, the time and rate of deglaciation (Ingólfsson and Landvik, 2013; Fjeldskaar et al., 2018), without taking into account the trend of modern tectonic movements and the geological structure of the archipelago.

The question of sea level change for the central part of West Spitsbergen Island - the region of the central part of Nordenskiöld Land, composed of Paleogene rocks, remains open. The closest curve of early Holocene sea level change was constructed for the western coast of Nordenskiöld Land within the Ytterdalen Valley (Landvik et al., 1987), in the area of the outcrop of crystalline basement rocks. According to this curve, it is clear that the relative sea level during deglaciation was at 65 m, and a short period of stagnation at

50 m occurred about 10,000 years ago. However, the results of studying the bottom sediments of Lake Linné (Snyder and Werner, 2000) indicate that this body of water was isolated from the influx of sea waters about 9.6 thousand years ago at an altitude of less than 25 m above sea level.

Rarely does the attention of researchers turn to detailed reconstructions of changes in paleomarine conditions of the early Holocene and small-scale fluctuations in sea level that are not reflected in the relief. The research conducted by the staff of the Russian Arctic expedition on the Spitsbergen archipelago of the FSBI "AARI" and the Department of Geological Mapping of the FSBI "VNIIOkeangeologia" from 2018 to 2022 on Nordenskiöld Land and in the southwestern part of Oscar II Land (Fig. 1) was aimed at obtaining new paleogeographic data on the position of the relative sea level and detailing the ideas about the conditions of marine sedimentation in the early Holocene. This paper briefly presents the results of these studies.

2. Materials and methods

During the field work, walking routes were conducted with the study of marine terrace levels and the sediments that compose them.

The study of outcrops of Quaternary sediments (sections) included their preparation, description, sampling for various types of analysis. The description of the sections included the identification of homogeneous horizons, recording the color, composition, nature of the bedding of the constituent material, contact with the overlying and underlying horizons, elevation marks of the horizon boundaries and sampling sites,

*Corresponding author.

E-mail address: dasoloveva@aari.ru (D.A. Soloveva)

Received: June 05, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



recording the location of the objects studied. The complex of subsequent analytical studies included radiocarbon dating and microfaunistic analysis. In total, about 35 sections of marine sediments were described, more than 50 radiocarbon dates of mollusk shells were obtained, foraminiferal analysis was performed for 9 sections.

3. Results

The conducted research revealed that the studied marine sediments belong mainly to the early Holocene. The highest terrace levels where mollusk shells were collected in the sediments belong to the hypsometric levels of 30-35 m - in the southwestern part of Oscar II Land and 40-45 m in the north of Nordenskiöld Land. We did not find mollusk shells above these marks. Foraminifera complexes corresponding to the early Holocene sediments belong mainly to glacial-marine and shallow-water ones. The change in foraminiferal complexes in the sediments indicates unstable conditions in the paleo-bays (level and temperature). Additionally, the obtained radiocarbon dates of plant detritus at the contact with the underlying marine sediments indicate the establishment of continental conditions at the study points about 7500 cal. BP at altitudes of 15-20 m of the modern relative sea level.

4. Discussion

The data obtained during the study for the study area showed that the early Holocene marine sediments were formed in ice-marine and shallow marine conditions, with an unstable coastline. In the early Holocene, there were temporary decreases and increases in the level, which is not reflected in previous reconstructions. The most stable conditions in the paleo-bays were observed during the Holocene optimum (8000-9000 cal. yr BP). The subsequent retreat of the relative sea level was accompanied by a general cooling. The absence of direct data indicating the late Pleistocene - Holocene age of the marine terraces above 35 m and 45 m for the northern and southern parts of the study area, respectively, and shallow-water foraminiferal complexes in the deposits of the lower terrace levels (up to 20 m) indicate a more ancient age of the high terraces. Radiocarbon dating of continental sediments related to the early Holocene (Serebryanny et al., 1993, etc.) at low hypsometric elevations also confirms the conclusion made.

5. Conclusions

Thus, the issue of early Holocene transgression for the study area remains debatable. The sea level at that time probably reached lower elevations than previously thought and was unstable, which is not reflected in previous reconstructions. The studied marine sediments and foraminiferal complexes in them indicate shallow-water ice-sea and marine sedimentation conditions in the early Holocene and a rapid decrease in relative sea level during a general cooling. The obtained dating of continental sediments allows us to identify the moment of establishment of continental sedimentation conditions at elevations of 15-20 m relative sea level around 7500 cal. BP.

Acknowledgements

This study was supported by the Russian Scientific Center on Spitsbergen of Arctic and Antarctic Research Institute and FSBI "VNIIOKEANGEOLGIA".

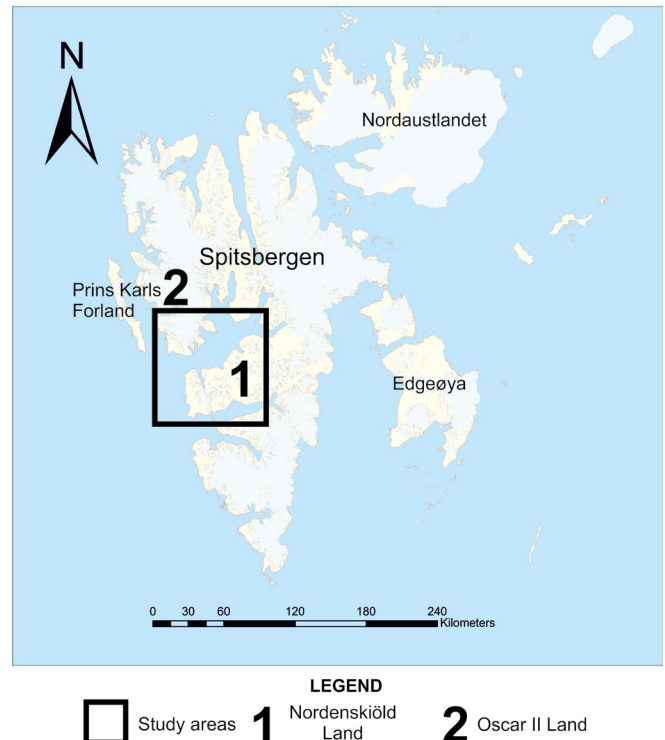


Fig.1. Study region

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bondevik S., Mangerud J., Ronnert L. et al. 1995. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard. *Polar Research* 14: 153–180.
- Fairbanks R.A. 1989. 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342: 637–642 DOI: [10.1038/342637a0](https://doi.org/10.1038/342637a0)
- Fjeldskaar W., Bondevik S., Amantov A. 2018. Glaciers on Svalbard survived the Holocene thermal optimum, *Quaternary Science Reviews*, Volume 199: 18-29.
- Feyling-Hanssen R.W. 1955. Late-Pleistocene of Billefjorden, West Spitsbergen. *Norsk Polarinst., Skriafter* 107: 186.
- Forman S.L. 1990. Post-glacial relative sea-level history of northwestern Spitsbergen, Svalbard. *Geological Society of America Bulletin*: 1580 – 1590.
- Forman S.L., Lubinski D.J., Ingólfsson O. et al. 2004. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews* 23: 1391 – 1434
- Ingólfsson Ó., Landvik J.Y. 2013. The Svalbard - Barents Sea ice-sheet - Historical, current and future perspectives. *Quaternary Science Reviews* 64: 33 – 60.
- Landvik J.Y., Mangerud J., Salvigsen O. 1987. The Late Weichselian and Holocene shoreline displacement on the west-central coast of Svalbard. *Polar Research* 5: 29 - 44.
- Serebryanny L.R., Tishkov A.A., Solomina O.N. et al. 1993. Paleoeecology of the Arcto-Atlantic during the Holocene. *Polar Geography and Geology* 17(2):110-125.

Snyder J.A., Werner A. Miller G.H. 2000. Holocene cirque glacier activity in western Spitsbergen, Svalbard: sediment records from proglacial Linnevatnet. *The Holocene* 10(5): 555 – 563.

Sharin V.V., Kokin O.V., Gusev E.A. et al. 2014. New geochronological data from Quaternary deposits in the north-western part of Nordenskiöld (Spitsbergen archipelago). *Bulletin of St. Petersburg University* 7: 159–168.

Раннеголоценовая трансгрессия в центральной части архипелага Шпицберген: результаты исследований и проблемы реконструкций

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСоловьева Д.А.^{1*}, Окунев А.С.², Куприянова Н.В.²¹ ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург, 199397, Россия² ФГБУ «ВНИИОкеангеологии», Английская наб., 1, Санкт-Петербург, 190121, Россия

АННОТАЦИЯ. В докладе представлены результаты изучения морских голоценовых отложений и террасовых уровней центральной части о. Западный Шпицберген. Результаты исследования показали, что послеледниковая трансгрессия в районе исследования достигала отметок 30-35 м и 40-45 м на севере и юге района исследования соответственно. Морские отложения раннего голоцена формировались в мелководных преимущественно ледово-морских условиях при нестабильном положении береговой линии. Отступление уровня моря было стремительным и сопровождалось общим похолоданием.

Ключевые слова: Шпицберген, четвертичные отложения, голоцен, изменения уровня моря

Для цитирования: Соловьева Д.А., Окунев А.С., Куприянова Н.В. Раннеголоценовая трансгрессия в центральной части архипелага Шпицберген: результаты исследований и проблемы реконструкций // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 684-689. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-684

1. Введение

Дегляциация архипелага Шпицберген сопровождалась эвстатическим подъемом уровня моря (Fairbanks, 1989). Скорость гляциоизостатического поднятия превысила этот показатель, что привело к постепенному снижению уровня (Forman et al., 2004). Основным источником данных о положении береговой линии в позднем неоплейстоцене – голоцене на архипелаге являются морские террасы и результаты определения возраста раковин моллюсков и костных остатков морских млекопитающих (Feyling-Hanssen, 1955; Forman et al., 2004 и др.), отображенных в наземных разрезах четвертичных отложений и на поверхностях террас (Forman, 1990; Bondevik et al., 1995). За последние 60 лет кривые послеледникового изменения уровня моря были построены для большинства районов Шпицбергена (Forman et al., 2004; Шарин и др., 2014 и др.).

При реконструкциях уровня моря авторы преимущественно оперируют тезисом, что изменение уровня моря зависело, прежде всего от толщины ледникового покрова, времени и скорости дегляциации (Ingólfsson and Landvik, 2013; Fjeldskaar et al., 2018), не принимая во внимание тренд современных тектонических движений и геологическое строение архипелага.

Вопрос изменения уровня моря для центральной части острова Западный Шпицберген – района центральной части Земли Норденшельда, сложенной палеогено-

выми породами, остается открытым. Ближайшая кривая изменения уровня моря раннего голоцена построена для западного побережья Земли Норденшельда в пределах долины Иттердален (Landvik et al., 1987), в области выхода пород кристаллического фундамента. В соответствии с этой кривой видно, что относительный уровень моря в ходе дегляциации находился на отметке 65 м, а короткий период стагнации на уровне 50 м происходил около 10 000 л.н.. Однако результаты изучения донных осадков озера Линне (Snyder and Werner, 2000) свидетельствуют об изоляции этого водоема от поступления морских вод около 9,6 тыс. л.н. на высоте менее 25 м. над уровнем моря.

Редко внимание исследователей обращено к детальным реконструкциям изменения палеоморских условий раннего голоцена и мелкомасштабным колебаниям уровня моря, не нашедшим отражения в рельефе.

Исследования, проведенные сотрудниками российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген ФГБУ «ААНИИ» и отдела геологического картирования ВНИИОкеангеологии с 2018 по 2022 годы на Земле Норденшельда и в юго-западной части Земли Оскара II (Рис.1), были направлены на получение новых палеогеографических данных о положении относительного уровня моря детализации представлений об условиях морского осадконакопления в раннем голоцене. В данной работе кратко представлены результаты этих исследований.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: dasoloveva@aari.ru (Д.А. Соловьева)

Поступила: 05 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

В ходе полевых работ проводились пешие маршруты с изучением морских террасовых уровней и слагающих их отложений.

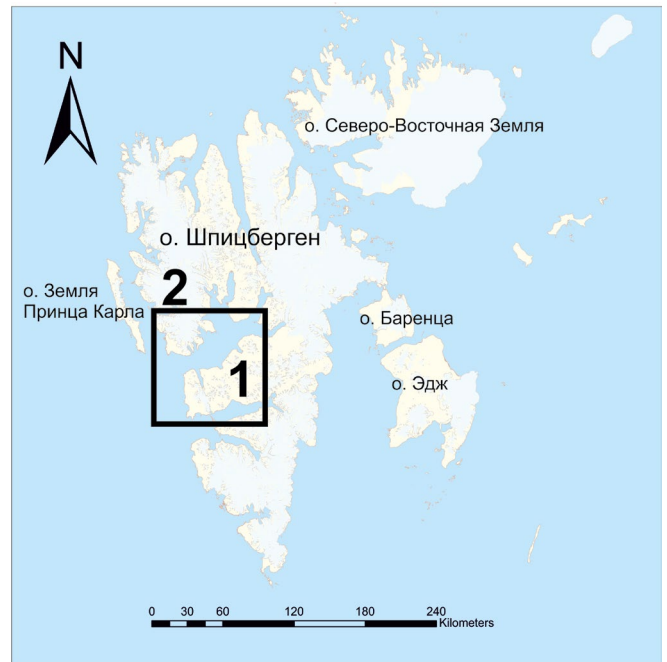
Изучение естественных обнажений четвертичных отложений (разрезов) включало в себя их подготовку, описание; отбор образцов на различные виды анализов. Описание разрезов включало в себя выделение однородных горизонтов, фиксирование цвета, состава, характера залегания слагающего материала, контакт с перекрывающими и подстилающими горизонтами, высотные отметки границ горизонтов и места отбора образцов, фиксацию местоположения изученных объектов. Комплекс последующих аналитических исследований включал в себя радиоуглеродное датирование и микрофаунистический анализ. Всего было описано порядка 35 разрезов морских отложений, получено более 50 радиоуглеродных датировок раковин моллюсков, для 9 разрезов был выполнен фораминиферовый анализ.

3. Результаты

В результате проведенных исследований было выявлено, что изученные морские отложения относятся преимущественно к раннему голоцену. Самые высокие террасовые уровни, где были отобраны раковины моллюсков в отложениях относятся к гипсометрическим уровням 30-35 м. - в юго-западной части Земли Оскара II и 40-45 м. на севере Земли Норденшельда. Выше этих отметок нами не была обнаружена малакофауна. Фораминиферовые комплексы, соответствующие отложениям раннего голоцена относятся преимущественно к ледниково-морским и мелководным. Смена комплексов фораминифер в отложениях указывает на нестабильные условия в палеозаливах (уровня и температуры). Дополнительно полученные радиоуглеродные датировки растительного детрита на контакте с нижележащими морскими осадками указывают а установление континентальных условий в точках исследования около 7500 кал.л.н. на высотах 15-20 м современного относительного уровня моря.

4. Обсуждение

Полученные в ходе исследования данные для разных частей района исследования, показали, что морские раннеголоценовые осадки формировались в ледово-морских и морских мелководных условиях, с нестабильным положением береговой линии. В раннем голоцене происходили временные снижения и повышения уровня, что не отражается в предшествующих реконструкциях. Наиболее стабильные условия в палеозаливах наблюдались в оптимум голоцена. (8000-9000 кал.л.н.). Последующее отступление относительного уровня моря сопровождалось общим похолоданием. Отсутствие прямых данных, указывающих на позднеоплейстоценовый - голоценовый возраст морских террас выше 35 м. и 45 м. для северной и южной части района исследования соответственно и мелководные фораминиферовые комплексы в отложениях нижних террасовых уровней (до 20 м) указывают на более древний возраст высоких террас. Радиоуглеродные датировки континентальных отложений, относящиеся к раннему голоцену (Serebryannyy et al., 1993 и др.) на низких гипсометрических отметках также подтверждают сделанный вывод.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ
 □ Район исследований 1 Земля Норденшельда 2 Земля Оскара II
 Рис.1. Район исследования

5. Выводы

Таким образом, вопрос раннеголоценовой трансгрессии для района исследования остается дискуссионным. Уровень моря в это время, вероятно, достигал меньших отметок, чем это считалось ранее, и был нестабилен, что не отображается в предшествующих реконструкциях. Изученные морские отложения и фораминиферовые комплексы в них говорят о мелководных ледово-морских и морских условиях осадконакопления в раннем голоцене и быстром снижении относительного уровня моря при общем похолодании. Полученные датировки континентальных осадков позволяют выявить момент установления континентальных условий осадконакопления на отметках 15-20 м относительного уровня моря около 7500 кал.л.н.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Bondevik S., Mangerud J., Ronnert L. et al. 1995. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard. *Polar Research* 14: 153-180.
- Fairbanks R.A. 1989. 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature* 342: 637-642 DOI: [10.1038/342637a0](https://doi.org/10.1038/342637a0)
- Fjeldskaar W., Bondevik S., Amantov A. 2018. Glaciers on Svalbard survived the Holocene thermal optimum, *Quaternary Science Reviews*, Volume 199: 18-29,
- Feyling-Hanssen R.W. 1955. Late-Pleistocene of Billefjorden, West Spitsbergen. *Norsk Polarinst., Skriafter* 107: 186.

Forman S.L. 1990. Post-glacial relative sea-level history of northwestern Spitsbergen, Svalbard. *Geological Society of America Bulletin*: 1580 – 1590.

Forman S.L., Lubinski D.J., Ingolfsson O. et al. 2004. A review of postglacial emergence on Svalbard, Franz Josef Land and Novaya Zemlya, northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews* 23: 1391 – 1434

Ingólfsson Ó., Landvik J.Y. 2013. The Svalbard - Barents Sea ice-sheet - Historical, current and future perspectives. *Quaternary Science Reviews* 64: 33 – 60.

Landvik J.Y., Mangerud J., Salvigsen O. 1987. The Late Weichselian and Holocene shoreline displacement on the west-central coast of Svalbard. *Polar Research* 5: 29 - 44.

Serebryanny L.R., Tishkov A.A., Solomina O.N. et al. 1993. Paleoecology of the Arcto-Atlantic during the Holocene. *Polar Geography and Geology* 17(2): 110-125.

Snyder J.A., Werner A. Miller G.H. 2000. Holocene cirque glacier activity in western Spitsbergen, Svalbard: sediment records from proglacial Linnevatnet. *The Holocene* 10(5): 555 – 563.

Шарин В.В., Кокин О.В., Гусев Е.А. и др. 2014. Новые геохронологические данные четвертичных отложений северо-западной части земли Норденшельда (архипелаг Шпицберген). *Вестник Санкт-Петербургского университета* 7: 159–168.

Changes in chironomid communities during the Holocene in Lake Polevskoye (Zaonezhsky Peninsula, northwestern Russia)



Syrykh L.S.^{1*}, Nazarova L.B.²

¹Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia

²Kazan (Volga) Federal University, Kazan, Russia

ABSTRACT. We reconstructed paleoclimatic and paleoenvironmental changes based on the analyses of sediments from the Lake Polevskoye on the Zaonezhsky Peninsula in northwestern Russia. The change in the taxonomic composition of chironomids was analysed in the studied core. The age of the sediments covers ca 7.1 thousand years. Based on the cluster analysis, 3 main stratigraphic zones were identified. From 7.1 to 5.2 ka cal. yrs. BP, phytophilic taxa associated with shallow lakes dominated. Later between 5.2 – 2.0 ka cal. yrs. BP chironomids biodiversity increased. During this period, cold-water taxa appeared, which might indicate some cooling during this period. There was also a simultaneous increase in the number of profundal and semi-terrestrial species, which may indicate the changes of the water level in the lake and paludification. After 2.0 ka cal. yrs. BP the total number of species decreased. The dominant taxa associated with shallow water levels and moderately warm climatic conditions. Changes in the taxonomic composition of chironomids in Lake Polevskoye responded to paleoenvironmental changes. During the studied period, there was an increase in diversity of chironomids and a change in dominant taxa. The reconstructed conditions showed an increase in the water level in the lake from 5.2 to 2.0 ka cal. yrs. BP, as well as a gradual increase in trophicity.

Keywords: paleolimnology, Polevskoye, Zaonezhsky Peninsula, northwestern Russia, chironomids, Holocene

For citation: Syrykh L.S., Nazarova L.B. Changes in chironomid communities during the Holocene in Lake Polevskoye (Zaonezhsky Peninsula, northwestern Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 690-695. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-690

1. Introduction

Non-biting midges, or chironomids (*Chironomidae*, Insecta: *Diptera*), are a diverse group of invertebrates whose distribution is largely determined by mean summer temperatures. These insects are also sensitive to variations in water depth, nutrient content, oxygen levels, and other environmental factors. Chironomid larvae are widely used in paleogeography studies as indicators of past climate and environmental conditions (Makarchenko and Makarchenko, 1999; Brooks et al., 2007; Nazarova et al., 2008; 2011).

The northern coast of Lake Onega has been relatively well-studied from the perspective of paleogeography. However, studies of chironomid communities in this area are still scarce. (Subetto, 2009; Subetto et al., 2017; Syrykh et al., 2021; Paleolimnology of Lake Onega..., 2022).

2. Materials and methods

We analysed the sediment core of the Lake Polevskoye (Zaonezhsky Peninsula). The age of the studied sediments is 7.1 ka years.

The chironomids analysis was carried out following by standard technic. (Brooks et al., 2007). Taxa identification and ecological description were carried out according to Brooks et al. (2007), Wiederholm (1983), Moller-Pillot (2009; 2013) and Nazarova et al. (2015; 2017; 2023).

3. Results and discussion

We analysed 30 samples in total. In each sample, were selected from 49 to 64 head capsules. Identified taxa belonged to 3 subfamilies: *Chironominae*, *Orthoclaadiinae*, *Tanypodinae*. *Tanytarsus pallidicornis*-type was found in almost all samples. Based on the

*Corresponding author.

E-mail address: lyudmilalsd@gmail.com (L.S. Syrykh)

Received: June 08, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



results of the cluster analysis, we identified three statistically significant areas in the studied sediment column:

Zone 1: 7.1 – 5.2 ka calibrated years BP (ka cal. yrs. BP) The ubiquitous taxa *T. pallidicornis*-type, *Chironomus anthracinus*-type, *Paratanytarsus penicillatus*-type, as well as *Stempellinella – Zavrelia*, which is often found in flowing water, dominate in this zone. In addition, *Corinoneura arctica*-type, *Chironomini* larvula, *Cricotopus intersectus*-type also prevail. These taxa are found mainly in mesotrophic and eutrophic water bodies. Species diversity and evenness are gradually increasing towards the upper part of the studied zone.

Zone 2: 5.2 – 2.0 ka cal. yrs. BP. With *T. pallidicornis*-type and *Stempellinella – Zavrelia* also dominate the phytophilic *Cladopelma lateralis*-type, *Procladius*, *Psectrocladius sordidellus*-type. *C. intersectus*-type, *Polypedilum nubeculosum*-type are also common. Profundal *Sergentia coracina*, *Zalutschia zalutschicola* и *Stempellina* appear in this zone. species diversity and evenness increase in the upper part of the zone, ca 3.5 – 2.0 ka cal. yrs. BP.

Zone 3: 2.0 – 0 ka cal. yrs. BP Dominant taxa are *T. pallidicornis*-type and *Cladotanytarsus mancus*-type. There were also identified subdominant *Psectrocladius sordidellus*-type, *Corinoneura arctica*-type, *Endochironomus alpinus*-type, *Procladius*.

The 3 main stages in the environmental and climatic development of the studied area over the past 7.1 ka years can be identified:

The period 7.1–5.2 ka cal. yrs. BP may be characterized by a relatively warm climate. During that time, the lake was shallow and warmed up well. The presence of *Paratanytarsus penicillatus*-type, *Cricotopus intersectus*-type indicated the overgrowth of the coastal zone.

The stage 5,2–2,0 ka cal. yrs. BP characterized by a cooling climate. During this time, there were fluctuations in the water level of the lake, as evidenced by the presence of *Stempellinella – Zavrelia*, *Stempellina*, *Georthocladius*. The water depth of the lake increased and various deep-water species such as *Sergentia coracina*-type, *Heterotrissocladius grimshawi*-type, *Zalutschia zalutschicola* appeared in the lake.

Since 2,0 ka cal. yrs. BP the climate became closer to the modern. There was an increase in mean July air temperature, and the climate became moderately warm. The lake water level stabilized, lake became eutrophic, and overgrowth in the coastal zone occurred.

4. Conclusions

The reconstruction of the Holocene environmental development of the studied area revealed the dynamics of warm to moderate temperature conditions, the presence of wetlands, and the transition from a relatively deep lake to a shallow lake with abundant macrophytes. After 5.2 ka cal. yrs. BP there were changes in the water level of the lake. The climatic conditions at the final stage of lake development were close to modern.

Acknowledgements

The study was performed within the framework of projects of the Ministry of Education of the Russian Federation (project VRFY-2023-0010), RFBR 18-35-00624 mol_a.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Brooks S.J., Langdon P.G., Heiri O. 2007. Using and identifying chironomid larvae in palaeoecology. QRA Technical Guide № 10, Quaternary Research Association, London, 276 p.
- Makarchenko E.A., Makarchenko M.A. 1999. Chironomids. Key to freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Vol. 4. Higher insects. Diptera. SPB: Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences, pp. 210-295 (in Russian)
- Moller-Pillot H.K.M. 2013. Chironomidae Larvae of the Netherlands and Adjacent Lowlands. In: Biology and Ecology of the Aquatic Orthocladinae. Vol. 3. Zeist, Netherlands: KNNV Publishing, 312 p.
- Moller-Pillot H.K.M. 2009. Chironomidae Larvae Volume 2 Biology and ecology of the Chironomini. KNNV Publishing. 270 p.
- Nazarova L., Herzschuh U., Wetterich S. et al. 2011. Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, north-eastern Russia. *Journal of Paleolimnology*. Vol. 45: 57–71. DOI:[10.1007/s10933-010-9479-4](https://doi.org/10.1007/s10933-010-9479-4)
- Nazarova L., Self A., Brooks S.J. et al. 2015. Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models. *Global Planetary Change*, Vol. 134: 10–25. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2014.11.015](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.015)
- Nazarova L.B., Self A.E., Brooks S.J. et al. 2017. Chironomid Fauna of the Lakes from the Pechora River Basin (East of European part of Russian Arctic): Ecology and Reconstruction of Recent Ecological Changes in the Region. *Contemporary Problems of Ecology*, 10, No. 4: 350–362. DOI: [10.1134/S1995425517040059](https://doi.org/10.1134/S1995425517040059)
- Nazarova L., Sryrykh L., Grekov I., et al. 2023. Chironomid-Based Modern Summer Temperature Data Set and Inference Model for the Northwest European Part of Russia. *Water*, 15: 976. DOI: [10.3390/w15050976](https://doi.org/10.3390/w15050976)
- Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Ushnitskaya L.A. et al. 2008. Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of Central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research. *Contemporary problems of ecology*, Vol. 1: 335–345. DOI: [10.1134/S1995425508030089](https://doi.org/10.1134/S1995425508030089)
- Paleolimnology of Lake Onega: from a periglacial lake to modern conditions. 2022. D. A. Subetto, N. A. Belkina, V. D. Strakhovenko, et al. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. 331 p. (in Russian).
- Subetto D.A. 2009. Lake bottom sediments: paleolimnological reconstructions. St.Petersburg: Publishing house of the Herzen State Pedagogical University. 339 p. (in Russian).
- Subetto D.A., Nazarova L.B., Pestryakova L.A. et al. 2017. Paleolimnological Studies in Russian Northern Eurasia: A Review. *Contemporary Problems of Ecology*, 10, No. 4: 327–335. DOI: [10.1134/S1995425517040102](https://doi.org/10.1134/S1995425517040102)
- Sryrykh L.S., Nazarova L.B., Subetto D.A. 2015. Preliminary data of climate changes on the Karelian Isthmus in the Holocene based on the results of chironomid and lithological analyses. *Transactions of the Karelian Research Center*

of the Russian Academy of Sciences, Limnology Series, 5: 53–59. (in Russian)

Syrykh L.S., Nazarova L.B., Subetto D.A. et al. 2020. First results of the study of subfossil chironomid communities (Chironomidae) in the bottom sediments of Lake Polevskoy, Zaonezhsky Peninsula, Karelia. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 3: 4–10. (in Russian)

Syrykh L., Subetto D., Nazarova L. 2021. Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database. *Journal of Paleolimnology*, 65: 369–375. DOI: [10.1007/s10933-020-00172-8](https://doi.org/10.1007/s10933-020-00172-8)

Wiederholm T. 1983. Chironomidae of the Holarctic Region, Keys and Diagnoses. Part 1—Larvae: *Entomologica Scandinavica*, Supplement 19. P. 1–457.

Динамика хирономидных сообществ в голоцене в озере Полевском (Заонежский полуостров, Северо-Запад России)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСырых Л.С.^{1*}, Назарова Л.Б.²¹Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия²Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ. С целью реконструкции природно-климатических условий была исследована колонка донных отложений оз. Полевского, Заонежский полуостров, Северо-Запад России. Было проанализировано изменение таксономического состава хирономид в разрезе донных отложений. Возраст исследованной колонки составляет 7,1 тысяч лет. На основании кластерного анализа было выделено 3 основных стратиграфических зоны. С 7,1 до 5,2 тыс. кал. л. н. преобладают фитофильные таксоны, обитатели неглубоких водоемов. Позднее с 5,2 – 2,0 тыс. кал. л. н. повышается общее разнообразие таксонов. В данный период появляются холодноводные таксоны, что может свидетельствовать о некотором похолодании в данный период. А также отмечено одновременное увеличение числа таксонов глубоководных и полуназемных, что может свидетельствовать о динамике уровня воды в озере и подтоплении прибрежной зоны. После 2,0 тыс. кал. л. н. общее количество таксонов снижается, преобладают таксоны предпочитающие неглубокие водоемы и умеренно теплые климатические условия. Изменение состава хирономидных сообществ в оз. Полевском отражает смену окружающих условий: в исследованный период отмечается увеличение разнообразия хирономид, смена доминантных таксонов. Реконструированные условия показывают повышение уровня воды в озере с 5,2 до 2,0 тыс. кал. л. н., а также постепенное увеличение трофности.

Ключевые слова: палеолимнология, Полевское, Заонежье, Северо-Запад России, хирономидный анализ, Голоцен

Для цитирования: Сырых Л.С., Назарова Л.Б. Динамика хирономидных сообществ в голоцене в озере Полевском (Заонежский полуостров, Северо-Запад России) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 690-695. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-690

1. Введение

Комары-звонцы или хирономиды (*Chironomidae*, Insecta: *Diptera*) является богатым видами семейством беспозвоночных, распространение которых в значительной мере ограничено температурой окружающей среды. Также чутко хирономиды реагируют на изменения глубины воды, трофность, содержание кислорода и другие показатели. Хирономиды широко используются в качестве индикаторов изменения климата и окружающей среды в палеогеографических исследованиях (Макарченко и Макарченко, 1999; Brooks et al., 2007; Nazarova et al., 2008; 2011).

Северное побережье Онежского озера достаточно хорошо исследовано с точки зрения палеогеографии, однако исследования хирономидных

сообществ достаточно редки на данной территории (Субетто, 2009; Субетто и др., 2017; Syrykh et al., 2021; Палеолимнология Онежского озера..., 2022).

2. Материалы и методы

Нами была проанализирована колонка донных отложений оз. Полевского (Заонежский полуостров). Возраст исследованных осадков составляет 7,1 тысяч лет.

Хирономидный анализ проведен в соответствии со стандартной методикой (Brooks et al., 2007). Идентификация таксонов и экологическая характеристика проводились согласно Brooks et al. (2007), Wiederholm (1983), Moller-Pilot (2009; 2013) и Nazarova et al. (2015; 2017; 2023).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lyudmilalsd@gmail.com (Л.С. Сырых)

Поступила: 08 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



3. Результаты и обсуждение

Нами было проанализировано 30 проб. В каждой пробе отобрано 49 – 64 головные капсулы. Все проанализированные таксоны принадлежат к 3 подсемействам: *Chironominae*, *Orthocladiinae*, *Tanytarsinae*. Практически во всех пробах обнаружен *Tanytarsus pallidicornis*-type. По результатам кластерного анализа в исследуемой колонке отложений было выделено три статистически значимых зоны:

Зона 1: 7,1 – 5,2 тысяч калиброванных лет назад (тыс. кал. л. н.). В данной зоне доминируют таксоны-убиквисты *T. pallidicornis*-type, *Chironomus anthracinus*-type, *Paratanytarsus penicillatus*-type, а также *Stempellinella – Zavrelia*, часто встречающаяся в проточных водоемах. Кроме того, преобладающими являются *Corinoneura arctica*-type, *Chironomini larvula*, *Cricotopus intersectus*-type. Представленные таксоны обитают преимущественно в мезо и эвтрофных водоемах. Видовое разнообразие и выравнивание сообществ постепенно повышаются в верхней части зоны.

Зона 2: 5,2 – 2,0 тыс. кал. л. н. Кроме *T. pallidicornis*-type и *Stempellinella – Zavrelia* доминируют также фитофильные *Cladopelma lateralis*-type, *Procladius*, *Psectrocladius sordidellus*-type. Кроме того, распространены *C. intersectus*-type, *Polypedilum nubeculosum*-type. Появляются профундальные *Sergentia coracina*, *Zalutschia zalutschicola* и *Stempellina*. Значения видового разнообразия и выравнивание сообществ повышаются в верхней части зоны около 3,5 – 2,0 тыс. кал. л. н.

Зона 3: 2,0 – 0 тыс. кал. л. н. Доминирующие таксоны – *T. pallidicornis*-type и *Cladotanytarsus mancus*-type. К субдоминантам относятся *Psectrocladius sordidellus*-type, *Corinoneura arctica*-type, *Endochoronomus albipenis*-type, *Procladius*.

В развитии природно-климатических условий исследуемого района за последние 7,1 тысяч лет можно выделить 3 основных этапа:

Этап 7,1–5,2 тыс. кал. л. н. характеризуется умеренно тёплым климатом. Водоём неглубокий, благодаря чему хорошо прогревается. Наличие *Paratanytarsus penicillatus*-type, *Cricotopus intersectus*-type свидетельствует о зарастании прибрежной зоны.

Этап 5,2–2,0 тыс. кал. л. н. отличается похолоданием климата. Реконструированные условия данного периода характеризуются некоторым повышением уровня воды в озере, о чём говорит наличие видов *Stempellinella – Zavrelia*, *Stempellina*, *Georthocladius*. Увеличивается глубина озера, в озере появляются профундальные таксоны, такие как *Sergentia coracina*-type, *Heterotrissocladius grimshawi*-type, *Zalutschia zalutschicola*.

С 2,0 тыс. кал. л. н. формируется климат близкий к современному, наблюдается повышение средней температуры воздуха, климат умеренно тёплый. Уровень воды в водоёме стабилизируется, увеличивается трофность, наблюдается зарастание прибрежной зоны.

4. Заключение

Реконструкция развития окружающей среды в голоцене исследуемой территории показала динамику теплых и умеренных температурных условий, присутствие заболоченных участков и переход от относительно глубокого водоема к мелкому с обилием макрофитов. После 5,2 тыс. кал. л. н. происходили изменения уровня воды в озере. Климатические условия на последней стадии развития водоема близки к современным.

Благодарности

Работа выполнена в рамках проектов Министерства Просвещения РФ (проект VRFY-2023-0010), РФФИ 18-35-00624 мол.а.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Макарченко Е.А., Макарченко М.А. 1999. Хиროномиды. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые. Двукрылые. СПб: Зоологический институт РАН. С. 210-295.
- Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. 2022. Д. А. Субетто, Н. А. Белкина, В. Д. Страховенко и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 331 с.
- Субетто Д.А. 2009. Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб: Издательство РГПУ им. А. И. Герцена. 339 с.
- Субетто Д.А., Назарова Л.Б., Пестрякова Л.А. и др. 2017. Палеолимнологические исследования в российской части северной Евразии: обзор. Сибирский экологический журнал, 4: 369-380. DOI [10.15372/SEJ20170401](https://doi.org/10.15372/SEJ20170401)
- Сырых Л.С., Назарова Л.Б., Субетто Д.А. 2015. Предварительные данные о развитии климата на территории Карельского перешейка в голоцене по результатам хиროномидного и литологического анализов. Труды Карельского научного центра РАН, Серия «Лимнология», 5: 53–59.
- Сырых Л.С., Назарова Л.Б., Субетто Д.А. и др. 2020. Первые результаты исследования субфоссильных сообществ хиროномид (*Chironomidae*) в донных отложениях оз. Полевского, Заонежский полуостров, Карелия. Астраханский вестник экологического образования, 3: 4–10.
- Brooks S.J., Langdon P.G., Heiri O. 2007. Using and identifying chironomid larvae in palaeoecology. QRA Technical Guide № 10, Quaternary Research Association, London, 276 p.
- Moller-Pillot H.K.M. 2009. Chironomidae Larvae Volume 2 Biology and ecology of the Chironomini. KNNV Publishing. 270 p.
- Moller-Pillot H.K.M. 2013. Chironomidae Larvae of the Netherlands and Adjacent Lowlands. In: Biology and Ecology of the Aquatic Orthocladiinae. Vol. 3. Zeist, Netherlands: KNNV Publishing, 312 p.

Nazarova L., Syrykh L., Grekov I., et al. 2023. Chironomid-Based Modern Summer Temperature Data Set and Inference Model for the Northwest European Part of Russia. *Water*, 15: 976. DOI: [0.3390/w15050976](https://doi.org/10.3390/w15050976)

Nazarova L., Herzsuh U., Wetterich S. et al. 2011. Chironomid-based inference models for estimating mean July air temperature and water depth from lakes in Yakutia, northeastern Russia. *Journal of Paleolimnology*. Vol. 45: 57–71. DOI: [10.1007/s10933-010-9479-4](https://doi.org/10.1007/s10933-010-9479-4)

Nazarova L., Self A., Brooks S.J. et al. 2015. Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models. *Global Planetary Change*, Vol. 134: 10–25. DOI: [10.1016/j.gloplacha.2014.11.015](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.015)

Nazarova L.B., Pestryakova L.A., Ushnitskaya L.A. et al. 2008. Chironomids (Diptera: Chironomidae) in lakes of Central Yakutia and their indicative potential for paleoclimatic research. *Contemporary problems of ecology*, Vol. 1: 335–345. DOI: [10.1134/S1995425508030089](https://doi.org/10.1134/S1995425508030089)

Syrykh L., Subetto D., Nazarova L. 2021. Paleolimnological studies on the East European Plain and nearby regions: the PaleoLake Database. *Journal of Paleolimnology*, 65:369–375. DOI: [10.1007/s10933-020-00172-8](https://doi.org/10.1007/s10933-020-00172-8)

Wiederholm T. 1983. Chironomidae of the Holarctic Region, Keys and Diagnoses. Part 1—Larvae: *Entomologica Scandinavica*, Supplement 19. P. 1–457.

Provenances of Upper Quaternary sediments in the Northern Caspian Sea



Tkach N.T.^{1*}, Sorokin V.M.¹, Luksha V.L.¹, Tkach A.A.²

¹Department of Oil-Gas Sedimentology and Marine Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1a, Moscow, 119991, Russia

²Laboratory of Pleistocene Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1a, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. This paper presents a generalization of the clay minerals composition in the sediments of the KOR-3 core located in the central part of the Northern Caspian Sea (19 samples). The history of changes in the different river basins contribution to the sedimentary supply in the central part of the Northern Caspian Sea could be traced by changes in clay mineral ratios in the Upper Quaternary sediments. Changes in the ratio reflect differences in material sources during the first and second stages of the Khvalynian transgression of the Caspian Sea — one of the most controversial stages in the history of the Caspian Sea. Consequently, our conclusion is that there were different causes of sea-level uprise at different stages of the transgression. The subsequent events (deep Mangyshlak regression and New Caspian transgression) are not associated with abrupt changes in the inflow of rivers into the Northern Caspian Sea, according to the composition of clay minerals.

Keywords: Caspian Sea, Khvalynian transgression, clay minerals

For citation: Tkach N.T., Sorokin V.M., Luksha V.L., Tkach A.A. Provenances of Upper Quaternary sediments in the Northern Caspian Sea // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 696-699. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-696

1. Introduction

The Caspian Sea is the largest enclosed inland basin in the world. Nowadays it is a lake system, but in the Quaternary it was repeatedly connected to the world ocean during the transgressive stages of the Caspian Sea. One of the most extensive transgressions was the Khvalynian transgression at the end of the Late Pleistocene. The causes, extent and timescale of this transgression are still debated in the scientific community.

The aim of this research is to study the changes in provenance of the Upper Quaternary sediments of the Northern Caspian Sea (Atelian, Khvalynian, Mangyshlakian, Novocaspian), tracing possible changes in riverine supply during the Late Pleistocene and Holocene. This could show us the relationship between transgressive-regressive events in the Caspian Sea and changes in the source of sedimentary supply.

2. Materials and methods

The KOR-3 core was drilled in the Shirotnaya Depression in the central part of the northern Caspian Sea at a water depth of 12 m as part of the engineering geological survey by “Morinzhgeologiya” LLC and transferred for study to the Department of Oil-Gas Sedimentology and Marine Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. The length of the studied part of the core is 25 m and covers the second half of the Late Quaternary according to radiocarbon dates (Sorokin et al., 2023).

Clay mineral compositions were determined for 19 samples from the core. Composition was determined for the <0.002 mm fraction by X-ray diffraction using a DRON-3M copper anode analyser at the Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. The mineral content was determined according to the method of P. Biscaye (Biscaye, 1965). Illite, smectite, kaolinite and chlorite were identified in the samples.

*Corresponding author.

E-mail address: tkachgeo@gmail.com (N.T. Tkach)

Received: June 02, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



3. Results and Discussion

Firstly, analysis of clay mineral content has shown that there is no correlation between their composition and grain size distribution: there are no significant correlations for clay, silt and sand fractions with clay minerals. The illite content is highest in the lower part of the Khvalynian marine sediments (55%). In the underlying Atelian deposits and the overlying Mangyshlakian and Novocaspian deposits its content is lower and varies between 40-50%. Smectite content has a high negative correlation with illite content. The Atelian deposits contain 30-40% smectite, in the lower part of the Khvalynian it does not exceed 25%, and in the upper part of the Khvalynian and overlying Mangyshlakian and Novocaspian deposits it reaches maximum values of 38-57%.

The distribution of chlorite and kaolinite in the core sediments follows a slightly different pattern. However, at the base of the lower part of the Khvalynian deposits, the content of both chlorite and kaolinite is peaked (up to 15 %), and in the middle of the upper part of the Khvalynian, only a relative peak in chlorite content (10 %) is observed.

For the purpose of comparing the composition of the clay minerals in the sediments of the North Caspian with their composition in the main source of material input to the study area - the Volga - the composition of the clay minerals in the Volga basin was analysed. The Volga Basin was divided into two parts: the Upper Volga and the Kama basins, which represent the areas of the Russian Plain with a different composition of the rocks. In the Upper Volga basin, the main source of material are moraines of different ages, in which, according to N. Sudakova and coauthors (2014), the illite component predominates. In the Kama Basin, erosion mainly affects Permian-Triassic rocks, characterized by a significant smectite predominance over other minerals (Mouraviev et al., 2020). The main source of chlorite and kaolinite to the sediments of the Northern Caspian Sea is the catchment area of the Ural River (Turovskiy et al., 1981).

Analysis of the distribution of clay minerals in the KOR-3 core indicates that (1) during the Atelian stage the supply of material from the Kama basin was predominant relative to the Upper Volga; (2) at the beginning of the Khvalynian stage the supply from the Upper Volga basin was predominant, which may have been accompanied by an increase in the contribution of Ural river runoff; by the end of the Khvalynian stage, input from the Kama basin gradually became dominant; (3) in the Mangyshlakian and Novocaspian stages, fluctuations in the ratio of Kama to Upper Volga runoff were insignificant.

4. Conclusions

The results of the analysis of clay mineral distribution in the Upper Quaternary sediments of KOR-3 core allow us to link the first stage of Khvalynian transgression with an increase in runoff from the Upper Volga basin. While the maximum stage of the transgression is more likely related to other reasons (since it is not sharply marked on the distribution curve of minerals in the borehole) - climatic or an increase in river runoff from other areas. On the other hand, during the stages of transition from the Atelian regression to the Khvalynian transgression and during its subsequent decline, the contribution of the Ural River to the material supply of the studied area changed rather not with an increase in runoff, but with the approach of the Ural estuary to the studied area.

Acknowledgements

We thank “Morinzhgeologiya” LLC for the core material.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Biscaye P.E. 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans. *Geological Society of America Bulletin* 76: 803-832.
- Mouraviev F., Arefiev M., Silantiev V. et al. 2020. Paleosols and host rocks from the Middle-Upper Permian reference section of the Kazan Volga region, Russia: A case study. *Palaeoworld*, 29-2: 405-425.
- Sorokin V. M., Yanina T. A., Romanyuk B. F. 2023. On the age of upper quaternary deposits of the northern caspian sea. *Moscow University Geology Bulletin* 78(5): 629–639.
- Sudakova N.G., Nemtsova G.M., Glushankova N.I. 2014. Paleogeographical patterns of variability in the composition of moraines in the central part of the East European Plain. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5: Geografia*, 4: 62-68 (in Russian)
- Turovskiy D.S., Kheirov M.B., Rateev M.A. 1981. Localization of clay minerals in the upper layer of bottom sediments of the Caspian Sea. *Lithology and Mineral Resources* 1: 6-17 (in Russian)

Питающие провинции верхнечетвертичных отложений Северного Каспия



Ткач Н.Т.^{1*}, Сорокин В.М.¹, Лукша В.Л.¹, Ткач А.А.²

¹Кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, Геологический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1а, Москва, 119991, Россия

²Лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1а, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлено обобщение результатов определения содержаний глинистых минералов в отложениях керна скважины KOR-3 в центральной части Северного Каспия по 19 пробам. Изменение соотношения минералов в верхнечетвертичных отложениях позволяет сделать заключение об истории изменения вклада разных рек и частей Волжского бассейна в привнос седиментационного материала в центральную часть Северного Каспия. В изменении соотношения минералов фиксируется разница в источниках привноса материала в первом и втором этапах хвалынской трансгрессии Каспийского моря, которая на сегодняшний день является одним из наиболее дискуссионных этапов развития Каспия. Это позволяет сделать заключение о её разных причинах в разные этапы подъема уровня моря. Последующие события (глубокая мангышлакская регрессия и новокаспийская трансгрессия) не связаны с серьезными изменениями в стоке рек, впадающих в Северный Каспий.

Ключевые слова: Каспийское море, хвалынская трансгрессия, глинистые минералы

Для цитирования: Ткач Н.Т., Сорокин В.М., Лукша В.Л., Ткач А.А. Питающие провинции верхнечетвертичных отложений Северного Каспия // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 696-699. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-696

1. Введение

Каспийское море представляет собой крупнейший в мире бессточный внутриконтинентальный водоем. На сегодняшний день он представляет собой озёрную систему, однако в своей четвертичной истории он неоднократно имел связь с Мировым океаном в трансгрессивные этапы развития Каспийского бассейна. Одной из наиболее обширных была хвалынская трансгрессия в конце позднего плейстоцена. Причины, масштабы и временные рамки этой трансгрессии до сих пор остаются предметом дискуссии в научном сообществе.

Данная работа направлена на изучение изменений в питающих провинциях верхнечетвертичных отложений Северного Каспия (ательских, хвалынских, мангышлакских, новокаспийских), что позволяет установить возможные смены источников стока в течение позднего плейстоцена и голоцена и установить, существует ли связь трансгрессивно-регрессивных событий в Каспии со сменой источника привноса седиментационного материала.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: tkachgeo@gmail.com (Н.Т. Ткач)

Поступила: 02 июня 2024; **Принята:** 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

2. Материалы и методы

Скважина KOR-3 пробурена в Широтной депрессии в центральной части акватории Северного Каспия, на глубине моря 12 м, в рамках инженерно-геологических изысканий компанией ООО «Моринжгеология» и передан для исследований на кафедру нефтегазовой седиментологии и морской геологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Длина изученной части керна составляет 25 м и, судя по результатам датирования, охватывает вторую половину позднечетвертичного времени (Sorokin et al., 2023).

В рамках исследования для образцов отложений из керна был определен состав глинистых минералов. Состав глинистых минералов для фракции <0.002 мм был изучен рентгенодифрактометрическим методом на анализаторе ДРОН-3М с медным анодом на Геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова. Содержание минералов выяв-

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



лялись при помощи метода П. Бискайе (Biscaye, 1965). В составе глинистых минералов отложений были определены следующие составляющие: иллит, смектит и смешаннослойные (далее для простоты обозначения упоминается как «смектит»), каолинит и хлорит.

3. Результаты и их обсуждение

В первую очередь, при анализе содержания глинистых минералов было установлено отсутствие связи их состава с гранулометрическим составом: значимые корреляции для фракций пелита, алевролита и песка с глинистыми минералами не выявлены. Содержание иллита достигает наибольших значений в нижней части морских хвалыньских отложений (55 %). В нижележащих ательских отложениях и вышележащих мангышлакских и новокаспийских его содержания ниже и варьируются в пределах 40-50 %. Содержания смектита имеют высокую отрицательную корреляцию с содержаниями иллита. В ательских отложениях содержится 30-40 % смектита, в нижней части хвалыньских — не более 25 %, а в верхней части хвалыньских и вышележащих мангышлакских и новокаспийских достигает максимальных значений 38-57 %.

Хлорит и каолинит распределяются по отложениям керна несколько по иному принципу. В целом отмечается тренд на уменьшение их содержания от более древних к более молодым отложениям (от 10 к 5 %), но в подошве нижней части хвалыньских отложений отмечаются пики содержаний и хлорита, и каолинита (до 15 %), а в середине верхней части хвалыни отмечаются только относительный пик содержания хлорита (10 %).

Для сравнения состава глинистых минералов в отложениях Северного Каспия с их составом в основном источнике привноса материала в исследуемой зоне — Волге — был проанализирован состав глинистых пород в водосборе Волги. Верхневолжский бассейн был разделен на две части: Верхневолжский и Камский, которые представляют разные по составу пород территории Русской равнины. В Верхневолжском бассейне основным источником материала служат разновозрастные морены, в которых по данным Н. Судаковой и соавторов (2014) отмечается преобладание иллитовой составляющей. В Камском же бассейне эрозии подвержены преимущественно пермско-триасовые породы, для которых характерно существенное преобладание смектита над остальными минералами (Mouraviev et al., 2020). Хлорит и каолинит в отложения Северного Каспия попадают в основном из бассейна р. Урал (Туровский и др., 1981).

Анализ распределения глинистых минералов по скважине KOR-3 позволяет выявить, что (1) в ательскую эпоху существовало преобладание привноса материала из Камского бассейна относительно Верхневолжского; (2) в начале хвалыньской эпохи

было преобладание привноса из Верхневолжского бассейна, которого при этом, возможно, сопровождалось увеличением вклада стока р. Урал; к концу хвалыньской эпохи постепенно становился доминирующим привнос из Камского бассейна; (3) в мангышлакскую и новокаспийскую эпохи флуктуации в соотношении стока из Камского и Верхневолжского бассейнов были незначительны.

4. Заключение

Результаты анализа распределения глинистых минералов в верхнечетвертичных отложениях скважины KOR-3 позволяют установить связь первого этапа хвалыньской трансгрессии с увеличением стока с Верхневолжского бассейна. В то время как максимальная стадия трансгрессии, скорее всего, связана уже с другими причинами (так как она резко не выделяется на кривой распределения минералов по скважине) — климатическими или же увеличением стока из других областей. При этом вклад реки Урал в привнос материала в изученный район менялся скорее не с увеличением стока, а с приближением устья Урала к району в этапы перехода от ательской регрессии к хвалыньской трансгрессии и при ее последующем спаде.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность ООО «Моринжгеология» за предоставленный буровой материал.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Судакова Н.Г., Немцова Г.М., Глушанкова Н.И. 2014. Палеогеографические закономерности изменчивости состава морен в центральной части Восточно-Европейской равнины. Вестник Московского университета. Серия 5: География. №4.: 62-68.
- Туровский Д.С., Хейров М.Б., Ратеев М.А. 1981. Локализация глинистых минералов в верхнем слое донных осадков акватории Каспийского моря. Литология и полезные ископаемые. №1: 6-17.
- Biscaye P.E. 1965. Mineralogy and Sedimentation of Recent Deep-Sea Clay in the Atlantic Ocean and Adjacent Seas and Oceans Geological Society of America Bulletin, 76: 803-832.
- Mouraviev F., Arefiev M., Silantiev V. et al. 2020. Paleosols and host rocks from the Middle-Upper Permian reference section of the Kazan Volga region, Russia: A case study. *Palaeoworld*, 29-2: 405-425.
- Sorokin V. M., Yanina T. A., Romanyuk B. F. 2023. On the age of upper quaternary deposits of the northern Caspian sea. *Moscow University Geology Bulletin*, Vol. 78, no. 5: 629-639.

On the features of authigenic minerals in bottom sediments of lakes formed during nival, humid and arid types of sedimentogenesis

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYStrakhovenko V.D.^{1*}, Ovdina E.A.¹, Malov G.I.¹, Malov V.I.¹, Subetto D.A.², Belkina N.A.^{2,3}¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (RAS), 3 Akad. Koptyug Pr., Novosibirsk, 630090 Russia² Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika Emb., Saint-Petersburg, 191186, Russia³ Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 50 Alexander Nevsky Pr., Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. The comparison of autigenic minerals from the bottom sediments of lakes located under conditions of nival, humid and arid sedimentation is carried out. The long-term presence of ice cover on the lake, which prevents the mixing of water masses, the introduction of terrigenous material, oxygen-free conditions in the residual part of the waters under the ice and their local supersaturation with gases, makes it possible to form autigenic minerals in fresh waters of lakes located under conditions of nival, humid and arid sedimentation. The shape of the crystalline aggregates of the newly formed phases is determined by the conditions of their crystallization, mainly by the ionic composition of the residual water and microbiological factors.

Keywords: mall lakes; autigenic minerals; bottom sediments; nival, humid and arid sedimentation

For citation: Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I., Malov V.I., Subetto D.A., Belkina N.A. On the features of authigenic minerals in bottom sediments of lakes formed during nival, humid and arid types of sedimentogenesis // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 700-705. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-700

1. Introduction

Nikolay M. Strakhov, Vladimir I. Vernadsky, Alexander P. Lisitzin and other scientists pointed out the multiphase nature of modern sedimentation in their works (Strakhov, 1954; Lisitzin, 2010). It is shown that the destruction of rocks is carried out in different ways in the humid, arid, and ice zones of the continents, and basically, the processing of organic matter by microbiological means is the driving force behind the formation of new mineral phases.

2. Materials and methods

This article discusses the features of modern mineral formation in bottom sediments of small lakes (56) located in conditions of nival, humid, and arid sedimentogenesis using the example of selected model lakes (with a similar composition of autigenic minerals, ash content, basic water ions, etc.). The samples of bottom sediments were selected in the period 1995-2023

y. in the different small lakes of Siberia and Republic Karelia (Lake Onego and 11 small lakes). Analytical studies were carried out in the Analytical Centre for Multi-Elemental and Isotope Research of the SB RAS (IGM, Novosibirsk). The major and trace element compositions were studied using the atomic absorption and the ICP-MS methods. A detailed study of the structural features, the morphology at the level of individual mineral grains of the *suspended matter* was carried out using scanning electron microscope (SEM). The specific modification of the equipment used an Si(Li) energetic detector, enabling quantitative chemical analysis to be carried out on micro volumes.

3. Results and discussions

There is the presence of autigenic minerals in almost all lakes from located in conditions of nival, humid, and arid sedimentogenesis by the study of samples of bottom sediments of lakes investigated the modern complex of mineralogical methods.

*Corresponding author.

E-mail address: strahova@igm.nsc.ru (V. Strakhovenko)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Opal or chalcedony, formed due to biogenic SiO_2 of fragments of shells of diatoms or macrophytes, is added to grains of terrigenous quartz in the bottom sediments of lakes located in conditions of nival, humid, and arid sedimentogenesis.

Pyrite is the second autigenic mineral that is present in the bottom sediments of lakes formed under conditions of all types of sedimentation. Pyrite occurs in the form of individual crystals, groups of crystals of octahedral, cubic, pentagonal decahedral shape (size from 1 to 2 microns) and frambohedra of different sizes in the bottom sediments of lakes formed during nival sedimentation, as well as in the case of humid and arid types of sedimentogenesis (Fig.1). The composition of pyrite usually corresponds to the formula, sometimes at the initial stage of framboid formation, water up to 5% is apparently present.

The formation of autochthonous organic matter in the water of lakes and its further transformations by microbiological means can be accompanied by the formation of autigenic carbonates of calcite-dolomite series, aragonite, siderite, rhodochrosite and magnesite in all lakes from located in conditions of nival, humid, and arid sedimentogenesis (Fig. 2). In lakes with water mineralization <1 g/l, the buried organic matter, decomposing during the ice cover of the waters, provides sharply reducing conditions in the bottom waters, especially in zones of the nival type of sedimentogenesis, which leads to the formation of case, skeletal and

dendrite forms during the formation of metacrystals of carbonates (Fig. 2), sulfates (gypsum and anhydrite) (Fig. 3) and barite (Fig. 4a, b).

The mobility of factors (zones of local super saturation of residual waters with gases, which is created due to a decrease in temperature, increased salinity of water due to freezing, decomposition of organic matter, anoxic conditions, etc.) determine the various forms of metacrystals, and sometimes the zonal structure of aggregates (Fig. 2b, 3). In cases of crystallization of mineral phases of carbonates, sulfates and other salts from solution under conditions of very sharp super saturation (with initial high mineralization of water >5 g/l) when part of the water freezes, cryptocrystalline (curdled) dolomite deposits are formed (Fig. 4c), finely needle-shaped gypsum aggregates (Fig. 3c). Ice cover on the water, which prevents the mixing of water masses, the introduction of terrigenous material and its hurricane flow during ice melting, disrupts the sequence of salt deposition from carbonates to halite and makes possible the joint association of metacrystals of gypsum, calcite, halite, and dolomite.

4. Conclusions

The variability of natural factors (long-term presence of ice cover on lakes, which prevents watering and the supply of terrigenous material, the anoxic situation in residual waters with local zones of gas super satura-

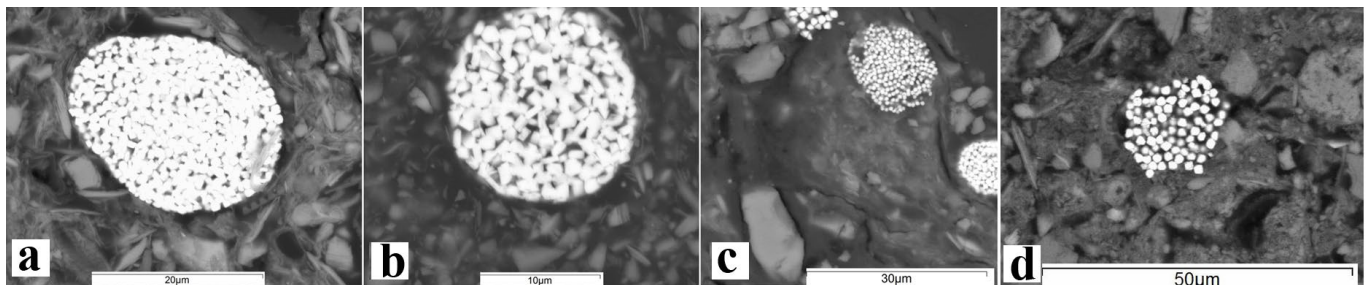


Fig.1. Electron microscope images: a - framboid pyrite formations are spherical aggregates of densely packed microcrystals having a rounded shape at the initial stage of formation in the bottom sediments of Lake Teplyj Klyuch in nival sedimentogenesis; b – framboid pyrite formations in varve clay of the Onego Ice Lake in nival sedimentogenesis; c - framboid pyrite in bottom sediments of Lake Bazovoe Shuchie in humid sedimentogenesis; d -- framboid pyrite in bottom sediments of Lake Tanatar 6 in arid sedimentogenesis.

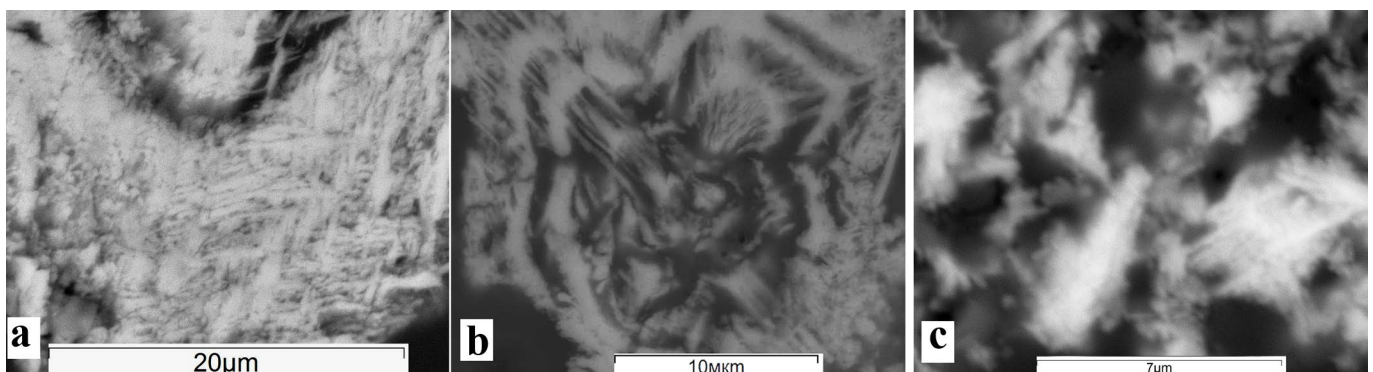


Fig.2. Electron microscope images: a - dendrite (polycrystalline) aggregates consisting of thin plates of calcite in bottom sediments of Lake Bolshoe Tarkhatinskoe in nival sedimentogenesis; b – radially radiant concentric-zonal spherulite of calcite from Lake Danilovo” sediments, formed in humid sedimentogenesis; c - dendrite (polycrystalline) aggregates consisting of thin plates of calcite in bottom sediments of Lake Rublevo in arid sedimentogenesis.

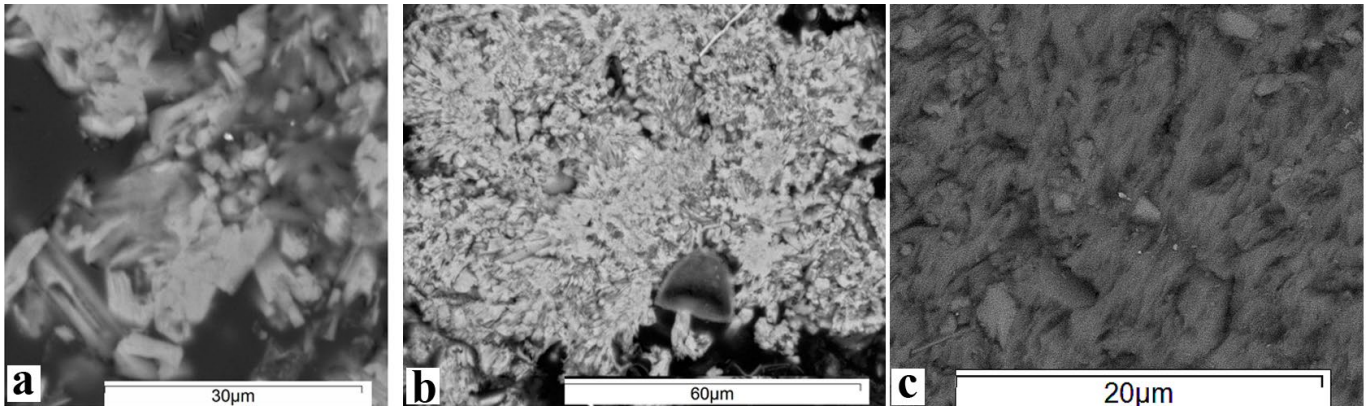


Fig.3. Electron microscope images: a - skeletal forms of gypsum metacrystals in bottom sediments of Lake Argamdzhi in nival sedimentogenesis; b – druse aggregate of metacrystals with case forms of anhydrite in bottom sediments of Lake Maloe Shuchie in humid sedimentogenesis; c - fusion of thin-plate gypsum crystals in bottom sediments of Lake Kurechie in arid sedimentogenesis.

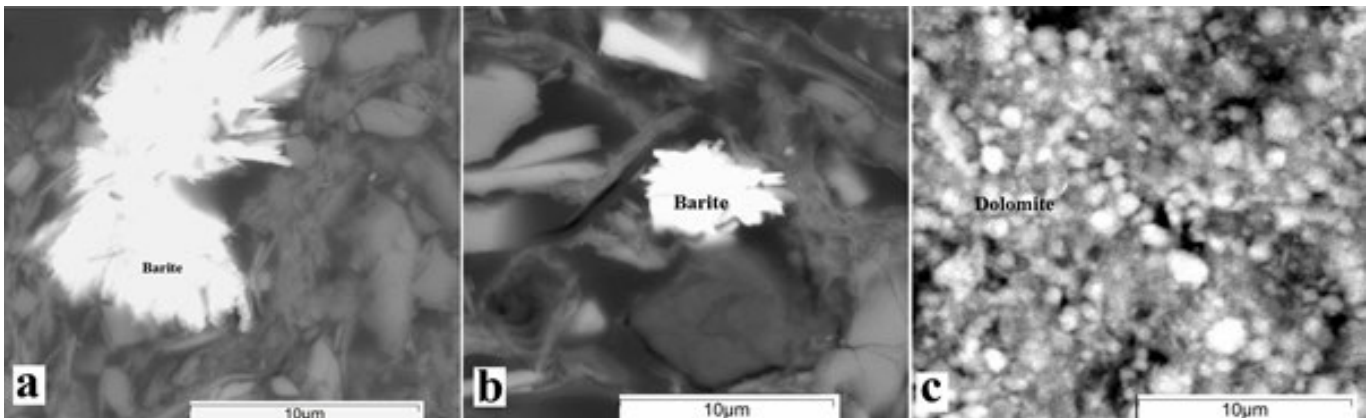


Fig.4. Electron microscope images: a - radially radiant fusion of barite plates in bottom sediments of Lake Maloe Tarkhatinskoe in nival sedimentogenesis; b – radially radiant fusion of barite plate in bottom sediments of Lake Peschanoe in humid sedimentogenesis; c - curdled aggregates of dolomite in bottom sediments of Lake Tanatar6 in arid sedimentogenesis.

tion, caused by the transformation of organic matter) provide the possibility of crystallization of authigenic minerals in the fresh waters of lakes located in nival, humid and arid sedimentogenesis, and determines the shape of crystalline aggregates of newly formed phases. At the same time, the sequence of precipitation of salts, from carbonates to sodium chloride, is dictated not so much by pH–Eh values, but by the ionic composition of freezing water and microbiological means. Chemical differentiation of the material in the bottom sediments is not manifested.

Acknowledgements

The study was carried out at the expense of a Russian Science Foundation grant № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Lisitzin A.P. 2010. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics* 51(1): 12–47. DOI: [10.1016/j.rgg.2009.12.002](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.002)
- Strakhov N.M. 1954. *Obshhaya skhema sedimentatsii v sovremennykh moryakh i ozerakh maloj mineralizatsii. Obrazovanie osadkov v sovremennykh vodakh* [The general scheme of sedimentation in modern seas and lakes of low mineralization. Precipitation formation in modern waters]. Moscow: Izd-vo Akademii nauk SSSR. (in Russian)

Особенности образования аутигенных минералов в донных отложениях озер, сформировавшихся в ходе нивального, гумидного и аридного типов седиментогенеза

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYСтраховенко В.Д.^{1*}, Овдина Е.А.¹, Малов Г.И.¹, Малов В.И.¹,
Субетто Д.А.², Белкина Н.А.^{2,3}¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Новосибирск, пр. ак. Коптюга 3, 630090, Россия² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки 48, 191186, Россия³ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, пр. Александра Невского 50, 185030, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведено сравнение аутигенных минералов из донных отложений озер, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного осадконакопления. Длительное нахождение на озере ледяного покрова, препятствующего перемешиванию водных масс, внесению терригенного материала, бескислородные условия в остаточной части вод подо льдом и их локальное перенасыщение газами, делает возможным образование аутигенных минералов в пресных водах озер, расположенных на глубине 100-150 км. в условиях нивального, влажного и засушливого осадконакопления. Форма кристаллических агрегатов новообразованных фаз определяется условиями их кристаллизации, главным образом ионным составом остаточной воды и микробиологическими факторами.

Ключевые слова: малые озера; аутигенные минералы; донные отложения; нивальный, гумидный и аридный типы седиментогенеза

Для цитирования: Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И., Малов В.И., Субетто Д.А., Белкина Н.А. Особенности образования аутигенных минералов в донных отложениях озер, сформировавшихся в ходе нивального, гумидного и аридного типов седиментогенеза // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 700-705. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-700

1. Введение

Н.М. Страхов, В.И. Вернадский, А.П. Лисицын и другие ученые в своих работах указывали на многофазный характер современного осадконакопления (Страхов, 1954; Лисицын, 2010 и др.). Показано, что преобразование горных пород осуществляется по-разному в зонах континента с различным типом седиментогенеза (гумидный, аридный и нивальный), и движущей силой образования новых минеральных фаз в донных отложениях является микробиологическая переработка органического вещества.

2. Материалы и методы

В данной статье рассматриваются особенности современного минералообразования в донных отложениях малых озер (56), расположенных в

условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза, на примере отобранных модельных объектах (со сходным составом аутигенных минералов, зольностью, основными ионами воды и др.). Образцы донных отложений отобраны в период 1995-2023 гг. в малых озерах Сибири и Республики Карелия (Онежское озеро и 11 озер). Аналитические исследования проводились в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН, Новосибирск. Содержания макро и микроэлементов изучены с использованием атомно-абсорбционного и ICP-MS методов. Детальное изучение структурных особенностей, морфологии на уровне минеральных зерен проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), оборудованного энергетический детектор Si(Li), позволяющий проводить количественный химический анализ на микрообъемах.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: strahova@igm.nsc.ru (В.Д. Страховенко)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



3. Результаты и обсуждение

Изучение донных отложений комплексом современных минералогических методов выявило наличие аутигенных минералов практически во всех озерах, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза. Фрагменты створок диатомовых водорослей или макрофитов, сложенных $\text{SiO}_{2\text{биог}}$, добавляют к зернам терригенного кварца опал или халцедон в сапропелевые залежи озер, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза. Пирит - второй по распространенности аутигенный минерал в донных отложениях озер, формирующихся в условиях всех типов осадконакопления. Пирит встречается в виде отдельных кристаллов, групп кристаллов октаэдрической, кубической, пентагондодекаэдрической формы (размером от 1 до 2 мкм) и фрамбоэдров (сферические агрегаты плотно упакованных микрокристаллов округлой формы), разного размера в донных отложениях озер (Рис. 1). Состав пирита обычно соответствует формуле, иногда на начальной стадии образования фрамбоида, по-видимому, присутствует до 5% воды.

Образование автохтонного органического вещества в воде озер и дальнейшие его преобразования микробиологическим путем может сопровождаться осаждением аутигенных карбонатов кальцит-доломитового ряда, арагонита в озерах, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного типа седиментогенеза (Рис. 2). В озерах, даже с минерализацией воды < 1 г/л, осевшее

на дно органическое вещество и разлагающееся в период ледяного покрова вод, обеспечивает резко восстановительные условия в придонных водах, особенно в зонах нивального типа седиментогенеза, что приводит к образованию скелетных, дендритовых форм метакристаллов карбонатов (Рис. 2), сульфатов (гипса и ангидрита) (Рис. 3) и барита (Рис. 4 а, б).

Мобильность факторов (зоны локального пересыщения остаточных вод газами, которое создается за счет понижения температуры, повышения минерализации вод за счет вымерзания, разложения органического вещества, бескислородных условий и др.) определяют различные формы метакристаллов, а иногда и зональное строение агрегатов (Рис. 2б, 3). В случаях кристаллизации минеральных фаз карбонатов, сульфатов и других солей из раствора в условиях очень резкого пересыщения (при начальной высокой минерализации вод (> 5 г/л) при вымерзании части воды, образуются скрытокристаллические выделения (творожистые) доломита (Рис. 4в), тонкоигольчатые агрегаты гипса (Рис. 3в). Ледяной покров в зимний период препятствует перемешиванию водных масс и привнесу терригенного материала. В весенний период при таянии льда создаются условия для ураганного поступления кластического материала, нарушается последовательность отложения солей от карбонатов до галита и делается возможным совместная ассоциация метакристаллов гипса, кальцита, галита и доломита.

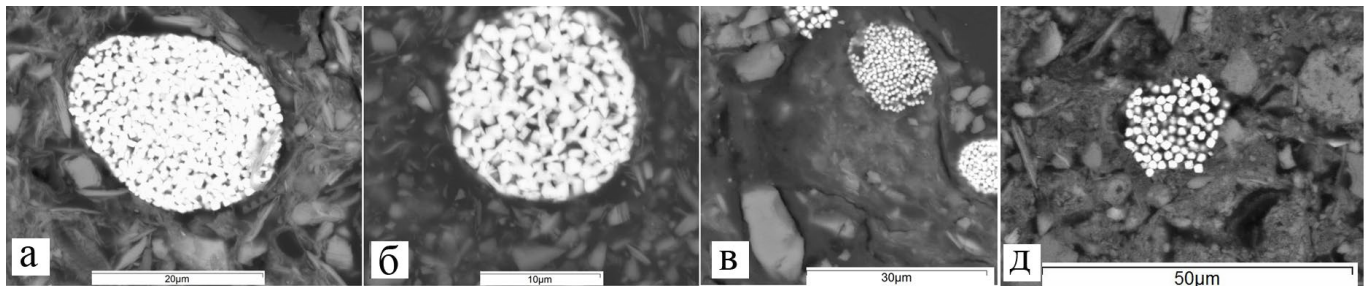


Рис.1. Изображения СЭМ: а - фрамбоидр пирита в донных отложениях оз. Теплый Ключ, расположенного в нивальном типе седиментогенеза; б - фрамбоидр пирита в ленточных глинах Онежского озера в нивальном типе седиментогенеза; в - фрамбоидры пирита в донных отложениях оз. Базовое Щучье в гумидном типе седиментогенеза; д - фрамбоидр пирита в донных отложениях оз. Танатарб в аридном типе седиментогенеза.

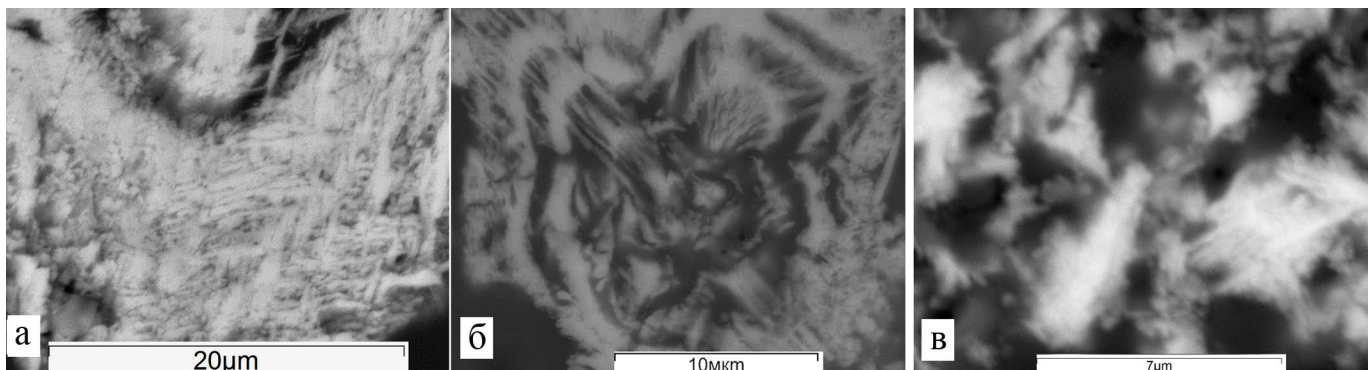


Рис.2. Изображения СЭМ: а - дендритные (поликристаллические) агрегаты, состоящие из тонких пластинок кальцита в донных отложениях оз. Большое Тархатинское в нивальном седиментогенезе; б - радиально-лучистые концентрически-зональные сферолиты кальцита оз. Данилово в гумидном седиментогенезе; в - дендритные (поликристаллические) агрегаты, состоящие из тонких пластинок кальцита в донных отложениях оз. Рублево в аридном седиментогенезе

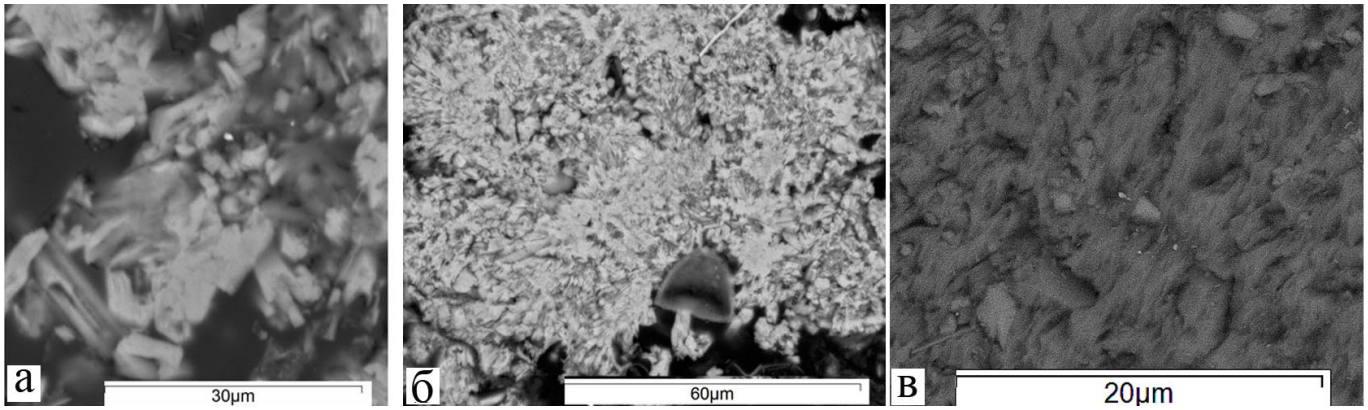


Рис.3. Изображения СЭМ: а - скелетные формы метакристаллов гипса в донных отложениях оз. Аргамджи в нивальном седиментогенезе; б – дроздовый агрегат метакристаллов с футлярными формами ангидрита в донных отложениях оз. Малое Щучье в гумидном седиментогенезе; в - срастания тонкопластинчатых кристаллов гипса в донных отложениях оз. Куречье в аридном седиментогенезе.

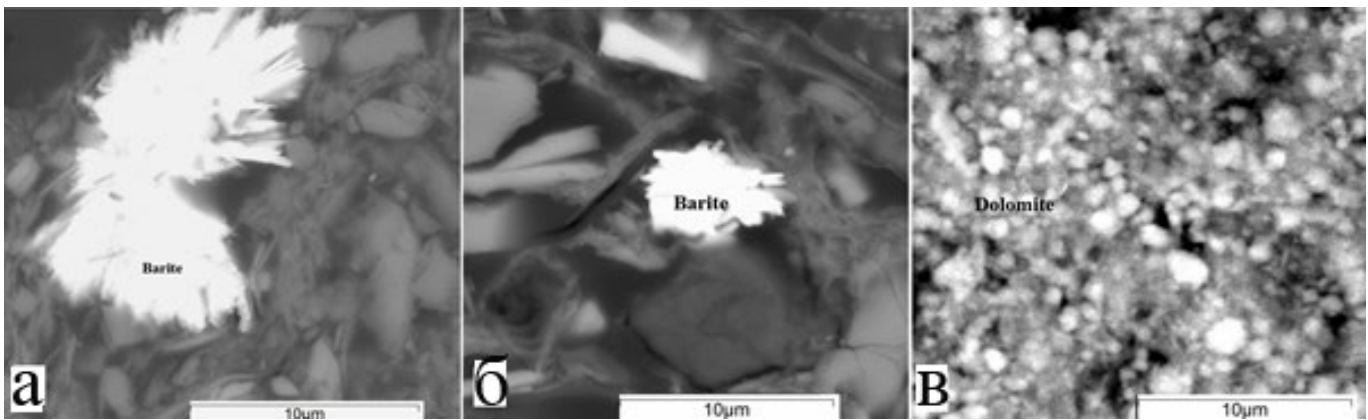


Рис.4. Изображения СЭМ: а - радиально-лучистое выделение барита в донных отложениях оз. Малое Тархатинское в нивальном седиментогенезе; б – радиально-лучистое выделение барита в донных отложениях оз. Песчаное в гумидном седиментогенезе; в – творожистые агрегаты доломита в донных отложениях оз. Танатарб в аридном седиментогенезе.

4. Заключение

Переменчивость природных факторов (длительное наличие ледяного покрова на воде, препятствующего обводнению и приносу терригенного материала, бескислородная ситуация в остаточных водах с локальными зонами газового пересыщения, обусловленная трансформацией органического вещества) обеспечивает возможность кристаллизация аутигенных минералов в пресных водах озер, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза, и определяет форму кристаллических агрегатов новообразованных фаз. При этом последовательность осаждения солей – от карбонатов до хлорида натрия – определяется не столько значениями pH–Eh, сколько ионным составом замерзающей воды и микробиологическим составом.

Благодарности

Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00111, <https://rscf.ru/en/project/23-27-00111/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Лисицын А.П. 2010. Новый тип седиментогенеза в Арктике - ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов. *Геология и геофизика*. 51 (1): 18–60.
- Страхов Н.М. 1954. Общая схема седиментации в современных морях и озерах малой минерализации. Образование осадков в современных водах. Москва: Изд-во Академии наук СССР.

New data on changes in the White Sea level on the Karelian coast the Holocene



Tolstobrov D.S.*, Tolstobrova A.N., Korsakova O.P., Vashkov A.A.

Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 14, Fersmana Str., 184209 Apatity, Russia

ABSTRACT. The article presents new data on the study of bottom sediments of a lake isolated from the sea basin in the area of the village of Chupa (North Karelia). A lake basin at an altitude of 34.0 meters was studied. Based on comprehensive study of the lake bottom sediments was established that the sea coastline was located at this altitude approximately 5800 years ago. The results of comparison of new data with data from earlier studies may indicate differentiated movements of blocks of the earth's surface, or a local activation of seismic processes in the Middle Holocene in this area.

Keywords: lake sediments, diatoms, radiocarbon age, sea-level changes

For citation: Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Korsakova O.P., Vashkov A.A. New data on changes in the White Sea level on the Karelian coast the Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - №4. - P. 706-711. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-706

1. Introduction

At the end of the Pleistocene, the northeastern part of the Baltic shield was covered with ice sheet, under the weight of which the earth's crust experienced isostatic subsidence. During the degradation of glaciers, the load was removed, and the earth's surface began to rise, while the sea coastline retreated. Records of changes in sea level are relief forms common on the shores, such as abrasion ledges, barrier beach, etc. Using the method of isolated basins, work to study changes in the position of the sea coastline on the Karelian coast has been carried out for many years (Kolka et al., 2013; 2014; 2015; Korsakova, 2022). The main characteristics of the rise dynamics of the earth's surface were established, but questions remain about the influence of tectonic processes on the rate of sea level change in the Middle Holocene. To resolve this issue, the bottom sediments of an unnamed lake located at an altitude of 34.0 meters above sea level (a.s.l.) in the area of the village Chupa were studied. As a result of a comprehensive study (lithological, diatom analyses, radiocarbon dating), new data on the sea level change on the Karelian coast were obtained.

2. Materials and methods

Bottom sediments of the lake with an altitude of 34.0 m above sea level were sampled during fieldwork

in 2017. The core of bottom sediments was taken from the ice at the central point (N66°17'59", E32°46'40"), using a piston drill with a diameter of 54 mm and a length of 1 meter. Description of the main characteristics (color, texture, grain size, etc.) of the lake bottom sediments was carried out in the field. Diatom analysis using standard methods was performed. The names of taxa are given according to the AlgaeBase database (Guiry and Guiry, 2022). Radiocarbon dating of the samples using the scintillation method in the laboratory of St. Petersburg State University was carried out. Dating results were calibrated using OxCal 4.4 (Bronk Ramsey, 2020).

3. Results and discussion

3.1. Lithology of bottom sediments

Core sampling was carried out from a depth of 7.30 m from the ice surface in the central part of the lake. The following sediments were recovered (description from bottom to top):

1. 9.90-9.20 m – layered silt. The layering is emphasized by color. The thickness of the layers is from 0.2 to 1.5 cm. The color of the layers is light brown, gray-green, dark brown and black;
2. 9.20-8.62 m – silt is unclearly layered, non-layered, greenish-brown in color, the transition to the underlying interval is gradual. From a depth

*Corresponding author.

E-mail address: d.tolstobrov@ksc.ru (D.S. Tolstobrov)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



of 8.70 m, the organic content increases, the color gradually changes to dark brown, and layering appears;

3. 8.62-8.56 m – silty gyttja, dark brown to black, thin-layered, the transition to the underlying layer is gradual;
4. 8.56-8.48 m – unlayered dark brown gyttja, mineral content less than 5%;
5. 8.48-8.40 m – gyttja is dark brown to black. There is some disturbance in this interval (loose, broken), probably as a result of core sampling. No mineral particles;
6. 8.40-7.30 m – gyttja is dark brown, monotonous, without mineral particles.

To determine the age of the sediments, three samples were taken for radiocarbon dating: №1 8.66-8.62 m (top of layer 2), №2 8.62-8.56 m (layer 3), №3 8.56- 8.51 m (bottom of layer 4).

3.2. Diatom analysis and radiocarbon dating

Dating № 1 (8.62-8.66 m) 6040 ± 120 cal. BP, obtained from thin-layered silt, judging by the analysis of diatom flora, reflects the time of accumulation of marine sediments. Marine (16%) and brackish-water species (67%) predominate here. The most abundant are *Cocconeis scutellum* Ehr., *Paralia sulcata* (Ehr.) Kütz., *Chaetoceros* sp., *Grammatophora oceanica* Ehr., *Hyalodiscus scoticus* (Kütz.) Grun. and *Rhabdonema minutum* Kütz.

In the overlying thin-layered silty gyttja, the number of marine species (polyhalobes) decreases to 1.5%, mesohalobes increases to 82%. There is a slight increase in the content of halophiles (5.5%) and indifferents (3%). Accordingly, dating № 2 from layer 3 (8.56-8.62 m) is 6090 ± 110 cal. BP shows the time when the lake began to be isolated from the sea basin.

According to diatom analysis dating № 3 from layer 4 (8.51-8.56 m.) 5810 ± 110 cal. BP, obtained from gyttja with mineral particles, shows the time interval when the lake was in the final stage of isolated from the sea basin. Here, in comparison with the underlying sediments, there is a significant decrease in marine and brackish-water species for 19% in the lower part of the interval, and already up to 1% in the upper. The number of halophiles also decreases to 2-5% and the number of indifferents and halophobes increases in total to 63-96%. Among the indifferents predominate *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth, *Aulacoseira valida* (Grun.) Kramm., *Discostella stelligera* (Cl. et Grun.) Houk et Klee, *Stauroforma exiguiformis* (Lange-Bert.) Flower, Jones et Round, among halophobes - *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz. and *T. flocculosa* (Roth) Kütz.

Based on diatom analysis and radiocarbon dating, it can be concluded that the lake basin was isolated from the sea basin approximately 5,800 years ago. In previous studies in the Chupa area sharp (instantaneous) change in sea level about 6300 years ago was noted (Kolka et al., 2015), which is reflected in the

same radiocarbon dating of sediments of two lakes at an altitude of 33.0 and 40.0 m. Dating №3 from layer 4 (8.51-8.56 m.) 5810 ± 110 cal. BP. can be compared with the dating of Lake Chupa-3 (33.0 m) 6354 ± 39 (Kolka et al., 2015), which also reflects the time of isolation of the lake from the sea. It can be seen that the two lake basins, located at almost the same altitude, were isolated at different times; the difference in the time of isolation is about 500 years. This fact may indicate both differentiated movements of blocks of the earth's surface in the Holocene, and local activation of the fault in the Middle Holocene in this area. At the same time, we should not exclude the possibility of older sediments in Lake Chupa-3 (33.0 m) (Kolka et al., 2015) as a result of the introduction of older organic matter by streams. If we mark the results of the study of the lake on a sea level curve for the Chupa (Kolka et al., 2015), then they correspond to a gradual regression of the sea. At present, it is not possible to confidently say about the existence or absence of block tectonics on the White Sea coast; it is necessary to continue research in this direction.

4. Conclusion

Lithological, chronological and micropaleontological data were obtained from the bottom sediments of an unnamed lake with an absolute altitude of 34.0 m above sea level in the area of the village Chupa. Research data shows that the sea coastline was at 34 m around 5,800 years ago. The separation from the sea of two lake basins, located at approximately the same altitude, at different times, may indicate differentiated movements of blocks of the earth's surface, or a local activation of seismic processes in the Middle Holocene in this area.

5. Acknowledgments

The work was carried out at the Geological Institute of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences on the topic of research work FMEZ-2024-0007.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bronk Ramsey C. 2020. OxCal 4.4 [Online resource]. URL: <http://c14.arch.ox.ac.uk>. (request date: 10.04.2024)
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2022. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, <http://www.algaebase.org>
- Kolka V.V., Korsakova O.P., Shelekhova T.S. et al. 2014. Temporal sequence of the White Sea shoreline movement in Holocene according to the study of bottom sediments of lakes in Kuusema region (North Karelia). Proceedings of the Russian Geographical Society 146(6): 14–26. (In Russian)
- Kolka V.V., Korsakova O.P., Shelekhova T.S. et al. 2013. Reconstruction of the relative level of the White sea during the Holocene on the Karelian coast near Engozero settlement,

northern Karelia. *Doklady Earth Sciences* 449(2): 434–438. (In Russian)

Kolka V.V., Korsakova O.P., Shelekhova T.S. et al. 2015. Reconstruction of the relative level of the White Sea during the Lateglacial – Holocene according to lithological, diatom analyses and radiocarbon dating of small lakes bottom sediments in the area of the Chupa settlement (north Karelia, Russia). *Bulletin of MSTU. Murmansk: MSTU* 18(2): 255–268. (In Russian)

Korsakova O.P. 2022. The White Sea Coasts within the Fennoscandian Crystal Shield in the Pleistocene and Holocene. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* 86(6): 883–897. DOI: [10.31857/S258755662206005X](https://doi.org/10.31857/S258755662206005X) (In Russian)

Новые данные об изменении положения береговой линии Белого моря на Карельском берегу в голоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Толстобров Д.С.*, Толстоброва А.Н., Корсакова О.П., Вашков А.А.

Геологический институт Кольского научного центра РАН; ул. Ферсмана, 14, 184209, Апатиты, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приводятся новые данные по изучению донных отложений озера, изолированного от морского бассейна в районе поселка Чупа (Северная Карелия). Была изучена озерная котловина на высотной отметке 34.0 метра над уровнем моря. В результате комплексного исследования донных отложений озера было установлено, что береговая линия моря располагалась на данной высоте примерно 5800 лет назад. Результаты сопоставления новых данных с уже известными могут указывать на дифференцированные движения блоков земной поверхности, либо на локальную активизацию сейсмических процессов в среднем голоцене в данном районе.

Ключевые слова: донные отложения озёр, диатомовый анализ, радиоуглеродное датирование, изменение уровня моря

Для цитирования: Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Корсакова О.П., Вашков А.А. Новые данные об изменении положения береговой линии Белого моря на Карельском берегу в голоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 706-711. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-706

1. Введение

В конце плейстоцена северо-восточная часть Балтийского щита перекрывалась ледниковым щитом, под тяжестью которого земная кора испытывала изостатическое погружение. В ходе деградации ледника нагрузка снималась, а земная поверхность начинала подниматься, при этом береговая линия моря отступала. Следы таких изменений положения береговой линии моря являются распространенные на берегах формы рельефа, такие как абразионные уступы, береговые валы и др. Используя метод изолированных котловин, работы по изучению изменения положения береговой линии моря на Карельском берегу проводятся уже много лет (Колька и др., 2013; 2014; 2015; Корсакова, 2022). Были установлены основные характеристики динамики поднятия земной поверхности, однако остаются вопросы о влиянии тектонических процессов на скорость изменения уровня моря в среднем голоцене. Для решения этого вопроса были исследованы донные отложения безымянного озера, расположенного на высотной отметке 34.0 метра над уровнем моря (н.у.м.) в районе пос. Чупа. В результате комплексного исследования (литологический, диато-

мовый анализ, радиоуглеродное датирование) были получены новые данные о положении береговой линии Белого моря на Карельском берегу в голоцене.

2. Материалы и методы

Донные отложения озера с абсолютной отметкой 34.0 м н.у.м. были отобраны во время полевых работ 2017 года. Отбор керн донных отложений проводился со льда в центральной точке (N66°17'59», E32°46'40»), поршневым буром диаметром 54 мм и длиной 1 метр. Описание основных характеристик (цвет, текстура, размер зерен и др.) донных отложений озера проводилось в полевых условиях. Диатомовый анализ выполнен по стандартной методике. Названия таксонов приведены по данным базы AlgaeBase (Guiry and Guiry, 2022). Радиоуглеродное датирование образцов выполнено сцинтилляционным методом в лаборатории Санкт-Петербургского государственного университета. Результаты датирования были откалиброваны с использованием программы OxCal 4.4 (Bronk Ramsey, 2020).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: d.tolstobrov@ksc.ru (Д.С. Толстобров)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



3. Результаты и их обсуждение

3.1. Литология донных отложений

Отбор керн проводился с глубины 7.30 м от поверхности льда в центральной части озера. Были вскрыты следующие осадки (описание снизу вверх):

1. 9.90-9.20 м – алеврит слоистый. Слоистость подчеркнута цветом. Мощность слоев от 0,2 до 1,5 см. Цвет слоев светло-коричневый, серо-зеленый, темно-коричневый и черный;
2. 9.20-8.62 м – алеврит неясно слоистый, неслоистый, зеленовато-коричневого цвета, переход в нижележащий интервал постепенный. Начиная с глубины 8.70 м увеличивается содержание органики, постепенно меняется цвет на тено-коричневый, появляется слоистость;
3. 8.62-8.56 м – алевритистая гиттия темно-коричневого до черного цвета, тонкослоистая, переход в нижележащий слой постепенный.
4. 8.56-8.48 м – гиттия неслоистая темно-коричневая, содержание минеральной части менее 5%;
5. 8.48-8.40 м – гиттия темно-коричневая до черного цвета. Отмечается некоторое нарушение в данном интервале (рыхлая, поломана), вероятно в результате отбора кернов. Минеральной части нет;
6. 8.40-7.30 м – гиттия темно-коричневая, монотонная, без минеральной части.

Для определения возраста отложений было отобрано три образца на радиоуглеродное датирование: №1 8,66-8,62 м (верх слоя 2), №2 8,62-8,56 м (слой 3), №3 8,56-8,51 м (низ слоя 4).

3.2. Диатомовый анализ и радиоуглеродное датирование

Датировка №1 (8,62-8,66 м) 6040 ± 120 кал. л.н., полученная из тонкослоистого алеврита, судя по анализу диатомовой флоры, отражает время накопления морских осадков. Здесь преобладают морские (16%) и солоноватоводные виды (67%). Наиболее обильны *Cocconeis scutellum* Ehr., *Paralia sulcata* (Ehr.) Kütz., *Chaetoceros* sp., *Grammatophora oceanica* Ehr., *Hyalodiscus scoticus* (Kütz.) Grun. и *Rhabdonema minutum* Kütz.

В вышележащей тонкослоистой алевритистой гиттии количество морских видов (полигалобов) снижается до 1.5%, мезогалобов увеличивается до 82%. Происходит небольшое увеличение содержание галофилов (5.5%) и индифферентов (3%). Соответственно, датировка № 2 из слоя 3 (8,56-8,62 м) 6090 ± 110 кал. л.н. показывает время начала изоляции озера от морского бассейна.

По данным диатомового анализа датировки № 3 из слоя 4 (8,51-8,56 м.) 5810 ± 110 кал. л.н., полученная из гиттии с минеральной частью, показывает временной интервал, когда рассматриваемое озеро находилось на заключительном этапе отделения от морского бассейна. Здесь по сравнению

с нижележащими осадками происходит значительное снижение морских и солоноватоводных видов в сумме до 19% в нижней части интервала, и уже до 1% - в верхней. Также уменьшается количество галофилов до 2-5% и увеличивается количество индифферентов и галофобов в сумме до 63-96%. Среди индифферентов преобладают *Aulacoseira subarctica* (O. Müll.) Haworth, *Aulacoseira valida* (Grun.) Kramm., *Discostella stelligera* (Cl. et Grun.) Houk et Klee, *Stauroforma exiguiiformis* (Lange-Bert.) Flower, Jones et Round, среди галофобов - *Tabellaria fenestrata* (Lyngb.) Kütz. и *T. flocculosa* (Roth) Kütz.

На основании диатомового анализа и радиоуглеродного датирования, можно сделать вывод, что озерная котловина была изолирована от морского бассейна примерно около 5800 лет назад. В ранее проведенных исследованиях в районе Чупа около 6300 лет назад отмечалось резкое (одномоментное) изменение уровня моря (Колька и др., 2015), которое отражено в одинаковых радиоуглеродных датировках осадков двух озер на отметках 33 и 40 м. Датировку № 3 из слоя 4 (8,51-8,56 м.) 5810 ± 110 кал. л.н. можно сопоставить с датировкой озера Чупа-3 (33.0 м) 6354 ± 39 (Колька и др., 2015), которая также отражает время изоляции озера от моря. Видно, что две озерные котловины, расположенные практически на одинаковых высотах, изолировались в разное время, разница во времени изоляции составляет около 500 лет. Данный факт может свидетельствовать как о дифференцированных движениях блоков земной поверхности в голоцене, так и о локальной активизации разлома в среднем голоцене в данном районе. При этом не стоит исключать возможности удревнения осадков озера Чупа-3 (33.0 м) (Колька и др., 2015) в результате привноса более древней органики ручьями. Если расположить результаты данного исследования озера на график перемещения береговой линии Белого моря в районе Чупа (Колька и др., 2015), то они соответствуют постепенной регрессии моря. В настоящее время нет возможности уверенно сказать о существовании или отсутствии блоковой тектоники на побережье Белого моря, необходимо продолжать исследования в данном направлении.

4. Заключение

В результате были получены литологические, хронологические и микропалеонтологические данные из донных отложений безымянного озера с абсолютной отметкой 34.0 м н.у.м. в районе пос. Чупа. Данные исследования показывают, что береговая линия моря находилась на отметке 34 м около 5800 лет назад. Отделение от моря двух озерных котловин, расположенных примерно на одинаковой высоте, в разное время, может указывать на сейсмическую активизацию в среднем голоцене.

Благодарности

Работа выполнена в Геологическом институте КНЦ РАН по теме НИР FMEZ-2024-0007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. 2014. Хронология и причины перемещения береговой линии Белого моря в голоцене по данным изучения донных отложений озер из района Кузема (северная Карелия). Известия русского географического общества 6: 14–26.

Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. 2013. Реконструкция относительного положения уровня Белого моря в голоцене на Карельском берегу (район пос. Энгозеро, северная Карелия). ДАН 449(5): 587–592.

Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С. и др. 2015. Восстановление относительного положения уровня

Белого моря в позднеледниковье и голоцене по данным литологического, диатомового анализов и радиоуглеродного датирования донных отложений малых озер в районе пос. Чупа (северная Карелия). Вестник МГТУ. Мурманск: МГТУ, 18(2): 255–268.

Корсакова О.П. 2022. Побережье Белого моря в пределах Фенноскандинавского кристаллического щита в неоплейстоцене и голоцене. Известия Российской академии наук. Серия географическая 86(6): 883–897. DOI: [10.31857/S258755662206005X](https://doi.org/10.31857/S258755662206005X)

Bronk Ramsey C. 2020. OxCal 4.4 [Online resource]. URL: <http://c14.arch.ox.ac.uk>. (request date: 10.04.2024)

Guiry M.D., Guiry G.M. 2022. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway, <http://www.algaebase.org>

Holocene stable oxygen isotope record from the North Caspian Rybachya core



Tkach A.A.^{1*}, Zenina M.A.^{2,3}, Yanina T.A.¹, Tkach N.T.⁴

¹Laboratory of Pleistocene Paleogeography, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1a, Moscow, 119991, Russia

²Laboratory of paleoceanology, Geological department, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Nakhimovsky prospect 36, Moscow, 117997, Russia

³A.V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Palchevsky 17, Vladivostok, 690041, Russia

⁴Department of Oil-Gas Sedimentology and Marine Geology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1a, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. The first results of 22 $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ measurements on ostracod shells from the Rybachya core in the North Caspian Sea are presented. The stable oxygen isotope record here confirms previous studies of Upper Quaternary and Holocene sediments of the Rybachya core area, where it was suggested that a paleovalley was formed during the Mangyshlak regressive stage and then gradually filled during the Holocene transgressive stage. We recorded three local isotopic stages, each characterized by $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values. The hydrological variability and sea level changes associated with the transgressive-regressive rhythm of the Caspian Basin and the climatic changes in the Northern Hemisphere led to the $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ changes obtained in this work. Relatively depleted $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values from sediments filling the paleovalley allowed to interpret the isotope record in terms of freshwater influx. The average ^{18}O enrichment of ostracod shells is taken as evidence for the isolation of the paleovalley during the Caspian Sea level retreat. However, the higher $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values obtained for the last (modern) stage of Caspian history are under the strong control of host water salinity, which is higher than during the paleovalley filling episode.

Keywords: Caspian Sea, Neocaspian transgression, Mangyshlak regression, stable oxygen analysis, paleovalley, Ostracoda

For citation: Tkach A.A., Zenina M.A., Yanina T.A., Tkach N.T. Holocene stable oxygen isotope record from the North Caspian Rybachya core // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 712-717. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-712

1. Introduction

The problem of multiscale fluctuations of the Caspian Sea level is of great importance nowadays. However, stable isotope studies of the intricate history of sea-level rise and fall have not been widely implemented. The North Caspian Sea sediments can provide detailed information on transgressive-regressive cycles of different amplitude and duration, particularly during the Holocene. As a reliable tool for paleogeographic reconstructions, the stable oxygen isotope record of such sediments can reveal environmental factors influencing the isotopic composition of carbonates to use isotope variations to indicate past environmental changes, reflecting both local (regional)

and global paleogeographic events. The purpose of this study is to elucidate the response of the stable oxygen isotope record of the Rybachya core to the paleogeographic changes that occurred in the North Caspian region during the Holocene and at the Late Pleistocene-Holocene boundary.

2. Materials and methods

The Rybachya core was recovered in the northern (shallowest) part of the Caspian Sea, near the Volga delta, at a water depth of 8 m (Fig. 1). The core was provided by LLC “Morinzhgeologiya” for a comprehensive study at the Laboratory of Pleistocene Paleogeography

*Corresponding author.

E-mail address: alinaberdnikowa@yandex.ru (A.A. Tkach)

Received: June 17, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



(Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University). The total length of the recovered core is 9.5 m. The radiocarbon dates of several core samples, lithological and geochemical analyses of the core sediments, and studies of the diatom, mollusk, and ostracod fauna have been published previously (Berdnikova et al., 2023; Lysenko et al., 2024). These studies include a detailed description of the lithological structure of the core and all the results.

Measurements of $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ were performed on ostracod shells using a Thermo Scientific MAT 253 isotope ratio mass spectrometer with the Kiel-IV automated carbonate device with a standard deviation of $\pm 0.04\text{‰}$. The international standard NBS-19 and the laboratory standard “Standard Bremen” were used for calibration. Specific $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values represent host water conditions. A specific isotopic offset (vital effect) for different Caspian ostracod taxa relative to the expected equilibrium value of inorganic calcite was presented by Tkach et al. (2024). In total, 22 samples were measured. The results are shown in Fig. 1.

3. Results and Discussion

Previous works (Berdnikova et al., 2023; Lysenko et al., 2024) allowed us to conclude that the sedimentary sequence of the Rybachya core captured paleogeographic events of different scales in one of the paleovalleys established in the North Caspian Sea by Bezrodnykh and Sorokin (2016). The four stages of gradual filling of the paleovalley have been described (Berdnikova et al., 2023; Lysenko et al., 2024). First, the Mangyshlak stream eroded the Upper Khvalynian deposits and formed the depression in the Lower Khvalynian deposits. Overlying sedimentary units were formed in accordance with the three events that occurred during the transgressive Neocaspian stage in the Holocene.

Three local oxygen isotope stages (LIS, Fig. 1) were traced along the Rybachya core sequence. A measurement at a depth of 635 cm corresponds to the lower

sedimentary unit (LIS 1) identified by Berdnikova et al. (2023) as Lower Khvalynian. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ value of -3.53‰ is relatively enriched in ^{18}O compared to other measurements along the core (Fig. 1).

In the overlying sediments (LIS 2), the stable oxygen isotope data do not allow us to unambiguously determine different isotopic stages for the first phase of paleovalley repletion suggested by Berdnikova et al. (2023): 1) a shallow stagnant freshwater environment until 7-8 cal. kyr BP, and 2) a transitional sedimentary environment from a quiescent hydrodynamic water regime to a more dynamic one around 7-8 cal. kyr BP. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values in the depth interval 184.5-331.5 cm decrease from -8.1‰ at the base of the sequence to -12.93‰ in its upper part (Fig. 1). This interval is also characterized by higher $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values in contrast to the general depleting trend: e.g. a local maximum at a depth of 243 cm with a $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ value of -6.8‰ (Fig. 1). Relatively depleted $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values from sediments filling the paleovalley allowed the isotopic record to be interpreted in terms of freshwater influx, while the average ^{18}O enrichment of ostracod shells is assumed to be evidence of paleovalley isolation during Caspian Sea level retreat and more stagnant hydrodynamic conditions in an isolated basin during a regressive episode of the Neocaspian epoch. Thus, we agree with Lysenko et al. (2024) that the sedimentary unit filling the studied paleovalley does not correspond to the transgressive but to the regressive stage of the Caspian history. The process of filling the depression with fresh water was accompanied by sea recession and isolation of the paleovalley. Eventually, salinity in this basin increased (probably due to evaporation rates and, according to diatom analysis results, lack of a constant freshwater source) until the basin became brackish.

We assume that the inflection points of the depleted isotope composition -14.3‰ and -13.91‰ at depths of 153.5 cm and 135.5 cm, respectively (Fig. 1), indicate the beginning of the modern stage in the paleogeographic history of the studied area, when the existing environmental conditions were interrupted by

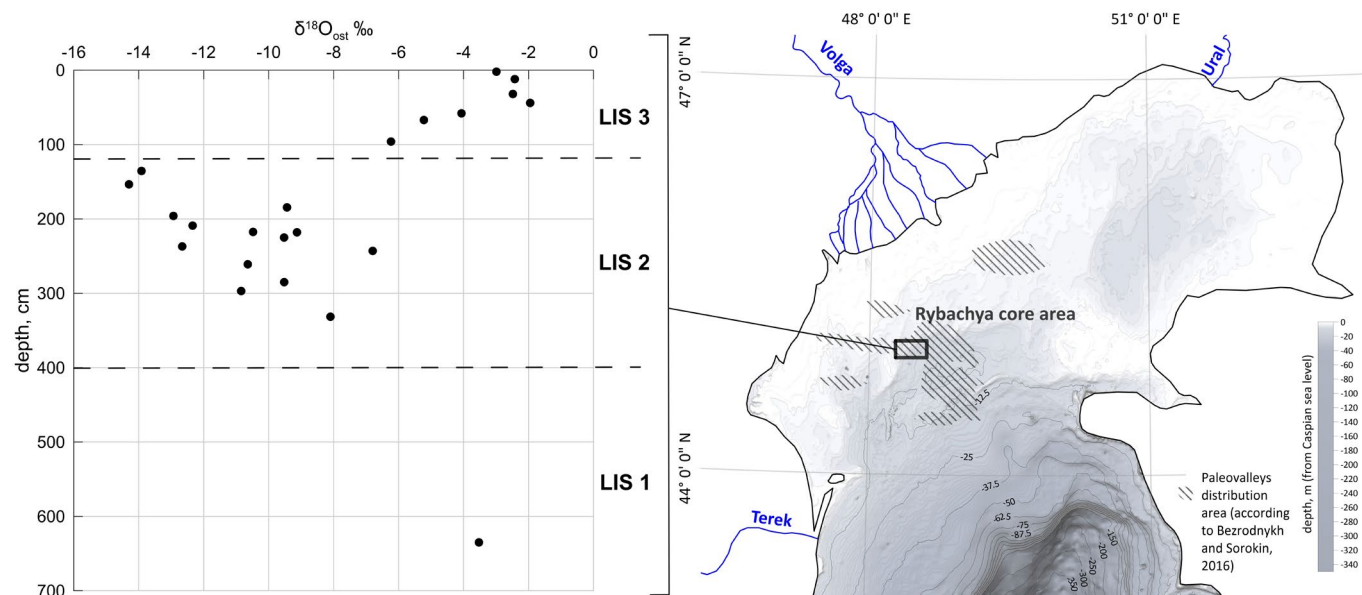


Fig.1. Location and stable oxygen isotope record of the Rybachya core.

the transitional phase of a higher-energy environment and the paleovalley was filled with fresh water again at the beginning of the Neocaspian transgression.

Subsequently, brackish conditions typical of the modern Caspian Sea (LIS 3) developed. The increased salinity of the North Caspian Sea during the Neocaspian correlates with the enrichment of the isotopic composition of ostracods from the upper core sequence, considering that variations in $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ can be directly related to changes in the salinity of the host water (Nikolaev, 1995). Apparently, the $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ values of about -2.5‰ (Fig. 1) correspond to the final stage of the Neocaspian transgression in the Rybachya core area (LIS 3).

4. Conclusions

Results of stable oxygen isotope analysis of ostracods confirm previously published data on paleogeographic reconstruction of North Caspian sedimentation conditions based on Rybachya core drilling data (Berdnikova et al., 2023; Lysenko et al., 2024). The Mangyshlak regression left no sedimentary traces in the studied area. At that time a stream eroded the Upper Khvalynian deposits and formed a depression in the Lower Khvalynian deposits. It was later filled up during the Holocene. The $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ record revealed several hydrological shifts reflecting Caspian Sea level changes, global and regional climate changes, freshwater influxes and periodic isolation of the study area. Similar results were previously reported for the nearby area of the North Caspian Sea, where cores GS 194-08-01 and GS 194-08-14 were recovered (Chekhovskaya et al., 2018).

Acknowledgements

The research was funded by the RSF grant №24-77-00011. We thank Taldenkova E.E. and foreign colleges for the help with stable oxygen isotope measurements, and LLC “Morinzhegeologiya” for the core material.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Berdnikova A., Lysenko E., Makshaev R. et al. 2023. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene. *Diversity* 15(2). DOI: [10.3390/d15020150](https://doi.org/10.3390/d15020150)
- Bezrodnikh Y.P., Sorokin V.M. 2016. On the age of the Mangyshlak deposits of the northern Caspian Sea. *Quaternary Research* 85(2): 245–254. DOI: [10.1016/j.yqres.2016.01.004](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2016.01.004)
- Chekhovskaya M.P., Zenina M.A., Matul A.G. et al. 2018. Ostracod-Based Paleoreconstructions on the Northern Caspian Sea Shelf during the Holocene. *Oceanology* 58(1): 79-91. DOI: [10.1134/S0001437018010010](https://doi.org/10.1134/S0001437018010010)
- Lysenko E.I., Tkach A.A., Makshaev R.R. et al. 2024. Palaeoecological situation in pre-delta area of the North Caspian Sea during the Holocene. *Lomonosov Geography Journal* 79(1): 61-77. DOI: [10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5) (in Russian)
- Nikolaev S.D. 1995. *Isotope paleogeography of inland seas*. Moscow: VNIRO (in Russian)
- Tkach A.A., Tkach N.T., Zenina M.A. 2024. Stable oxygen isotopes in modern ostracods from the Caspian Sea. *Journal of Paleolimnology*. DOI: [10.1007/s10933-024-00321-3](https://doi.org/10.1007/s10933-024-00321-3)

Изотопно-кислородная летопись голоцена Северного Каспия по данным керн скважины Рыбачья

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYТкач А.А.^{1*}, Зенина М.А.^{2,3}, Янина Т.А.¹, Ткач Н.Т.⁴

¹Лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, Географический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1а, Москва, 119991, Россия

²Лаборатория палеоокеанологии, Геологическое направление, ИО им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский проспект, 36, Москва, 117997, Россия

³Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского, ДВО РАН, Пальчевского, 17, Владивосток, 690041, Россия

⁴Кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, Геологический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1а, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. В настоящей работе впервые представлены результаты измерений $\delta^{18}\text{O}$ в 22 пробах раковин остракод из керн скважины Рыбачья в акватории Северного Каспия. Изотопно-кислородная летопись подтверждает выводы, сформулированные ранее благодаря комплексному изучению верхнечетвертичных и голоценовых отложений Каспийского моря в скважине, которая вскрывает палеопонижение, постепенно заполнявшееся в голоцене. Нами зафиксировано три локальных изотопных стадии, каждая из которых характеризуется более тяжелыми или более легкими показателями $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$. Эти изменения обусловлены перестройкой гидрографической сети вслед за изменением положения уровня Каспийского моря, связанного с его трансгрессивно-регрессивной ритмикой на фоне климатических изменений в Северном полушарии. Относительно изотопно-легкие значения во время заполнения палеовреза подтверждают мнение, согласно которому изученная область находилась под доминирующим влиянием проточных пресных вод. Отклонение значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ в сторону больших показателей, напротив, является свидетельством изоляции палеопонижения, когда уровень Каспийского моря колебался и вслед за подъемом следовало его падение. В то же время более высокие значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$, полученные для завершающей – современной стадии развития Каспия, характеризуют условия, в которых соленость стала выше, чем на этапе заполнения палеовреза.

Ключевые слова: Каспийское море, новокаспийская трансгрессия, мангышлакская регрессия, анализ стабильных изотопов кислорода, палеопонижения, остракоды

Для цитирования: Ткач А.А., Зенина М.А., Янина Т.А., Ткач Н.Т. Изотопно-кислородная летопись голоцена Северного Каспия по данным керн скважины Рыбачья // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 712-717. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-712

1. Введение

Проблема разномасштабных колебаний уровня Каспия особенно актуальна в современных условиях изменения климата. Тем не менее, изучение сложной истории развития Каспийского моря с точки зрения анализа стабильных изотопов не получило широкого распространения до настоящего времени. В отложениях Северного Каспия могут быть детально запечатлены голоценовые трансгрессивно-регрессивные события Каспийского моря. Изотопно-кислородная летопись таких отложе-

ний является надежным инструментом для реконструкций динамики изменения водоема в ходе накопления соответствующих отложений, а также индикатором изменений гидрологических условий, отражающих как локальные (региональные), так и глобальные палеогеографические события. Целью настоящей работы является выяснение отклика изотопно-кислородной летописи керн скважины Рыбачья на палеогеографические изменения, происходившие в акватории Северного Каспия в голоцене, а также на рубеже плейстоцена и голоцена.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: alinaberdnikowa@yandex.ru (А.А. Ткач)

Поступила: 17 июня 2024; **Принята:** 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

Скважина Рыбачья пробурена в акватории Северного Каспия – наиболее мелководной области Каспийского моря, вблизи дельты Волги, на глубине моря 8 м (Рис. 1). Керн скважины был предоставлен ООО «Моринжгеология» для комплексного исследования в НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена (Географический ф-т, МГУ им. М.В. Ломоносова) Общая длина керна составила 9,5 м. Ранее были опубликованы результаты радиоуглеродного датирования нескольких образцов керна, гранулометрического и геохимического анализов осадка, а также анализа содержащейся в нем фауны моллюсков, остракод и диатомей (Berdnikova et al., 2023; Лысенко и др., 2024). Указанные работы содержат подробное описание литологического строения керна и результатов его изучения.

Измерение изотопно-кислородного состава проведено по створкам остракод. Определенные значения (здесь и далее $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$) характеризуют изотопно-кислородный состав воды, в которой происходило формирование раковин. Показатели жизненных эффектов, приводящих к изотопным сдвигам, также были определены ранее (Tkach et al., 2024). Для настоящего исследования измерения проведены на масс-спектрометре Thermo Scientific MAT 253 с автоматическим устройством подготовки Kiel IV. Для калибровки использованы международный стандарт NBS-19 и лабораторный стандарт “Standard Bremen”, откалиброванный относительно стандарта NBS-19. Воспроизводимость, в среднем, составила $\pm 0.04\text{‰}$. Всего измерено 22 пробы, результаты измерений представлены на Рис. 1.

3. Результаты и их обсуждение

Предыдущие работы (Berdnikova et al., 2023; Лысенко и др., 2024) позволили заключить, что керн скважины Рыбачья запечатлел изменение условий

природной среды в палеопонижении в Северном Каспии (Bezrodnykh and Sorokin, 2016), и описать четыре этапа заполнения данного вреза. На первом этапе эрозионная деятельность водотоков мангышлакского времени привела к размыву позднехвалынских отложений и формированию понижения путем врезания в нижнехвалынские осадки. Следующие за этим события являются стадиями заполнения палеопонижения, соответствующими трем событиям новокаспийской трансгрессии Каспийского моря, развивавшейся в голоцене.

В настоящей работе прослежены три локальных изотопно-кислородных стадии (ЛИС, Рис. 1). Лишь одно измерение соответствует нижней пачке отложений (ЛИС 1), идентифицированных (Berdnikova et al., 2023), как нижнехвалынские. Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ здесь на глубине 635 см составляют $-3,53\text{‰}$ (Рис. 1), то есть относительно утяжелены относительно других измерений по скважине. В вышележащих отложениях (ЛИС 2) изотопно-кислородные данные не позволяют отчетливо разделить этапы, связанные непосредственно с заполнением палеовреза мангышлакского времени, а именно обстановки опресненного водоема озерного типа во время начальной стадии осадконакопления в палеопонижении до 7-8 кал. л. н.; и переходную обстановку осадконакопления от спокойного водного режима к более динамичному около 7-8 кал. л. н. (Berdnikova et al., 2023; Лысенко и др., 2024). Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ в интервале глубин 184,5-331,5 см понижаются от $-8,1\text{‰}$ в основании толщи до $-12,93\text{‰}$ в ее верхней части (Рис. 1). Для данного интервала также характерны пики утяжеления изотопно-кислородного состава на фоне общего тренда к снижению значений – например, пик на глубине 243 см со значением $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ равным $-6,8\text{‰}$ (Рис. 1). Изотопно более легкие значения по сравнению с нижележащим горизонтом подтверждают мнение, согласно которому в момент заполнения палеовреза эта область находилась под доминирующим влиянием пресных вод. Вероятно, отклонение значений

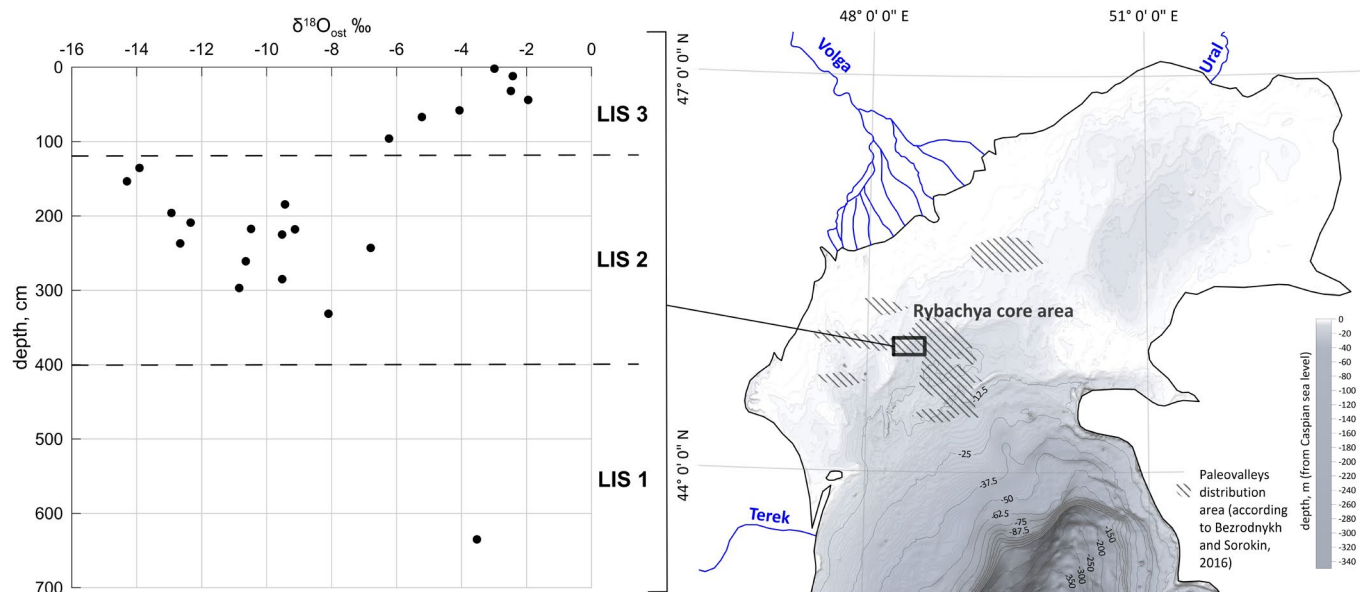


Рис.1. Местоположение скважины Рыбачья и результаты изотопно-кислородного анализа по вскрытым отложениям.

в сторону больших показателей $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ в рассматриваемом интервале глубин может быть свидетельством изоляции палеопонижения в ходе одного из этапов его заполнения, когда уровень Каспийского моря колебался и вслед за подъемом следовало его падение. Тем самым, подтверждается высказанное ранее мнение (Лысенко и др., 2024), согласно которому рассматриваемые отложения скважины Рыбачья, заполняющие палеоврез, соответствуют не максимуму трансгрессии, а обстановкам водоема, сформировавшегося при отступании моря. То есть на начальных этапах обособление палеопонижения сопровождалось процессом заполнения депрессии пресными водами, в результате чего был сформирован бассейн лагунного типа с низкой гидродинамикой, однако его соленость постепенно увеличивалась (вероятно, из-за испарения и отсутствия постоянного источника пресной воды, что подтверждается результатами диатомового анализа). Пики максимально легких изотопно-кислородных показателей $-14,3\text{‰}$ и $-13,91\text{‰}$ на глубинах 153,5 см и 135,5 см, соответственно (Рис. 1), интерпретируются нами как начало заключительного – современного этапа в развитии данного участка, во время которого врез вновь заполнялся пресной водой в результате интенсификации поверхностного стока в начале новокаспийской трансгрессии перед переходом к типичным для современного Каспия солонатоводным условиям, соответствующим ЛИС 3. Известно, что $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ может корректироваться в зависимости от солености воды. В результате более активной циркуляции и смешивания вод соленость Северного Каспия возрастала (Николаев, 1995), что неизбежно оказывало влияние на утяжеление изотопно-кислородного состава. Таким образом, вероятно, заключительный этап новокаспийской трансгрессии (ЛИС 3) в керне скважины Рыбачья нашел отражение в утяжелении показателей $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ до значений порядка $-2,5\text{‰}$ (Рис. 1).

4. Заключение

В целом результаты изотопно-кислородного анализа остракод, представленные в настоящей работе, подтверждают более ранние реконструкции палеогеографических обстановок и условий осадконакопления в Северном Каспии по данным бурения скважины Рыбачья (Berdnikova et al., 2023; Лысенко и др., 2024). Мангышлакская регрессия не оставила следов на изученном ключевом участке, в это же время в результате размыва верхнехвалынских

отложений и врезания водотока в раннехвалынские отложения сформировалось палеопонижение, которое заполнялось в голоцене. Значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ost}}$ фиксируют сложную ритмику перестройки существовавшего на данном месте водоема, смены его проточного режима и изоляции, а также величины влияния пресных речных вод и изменения уровня моря. Похожая на описанную в настоящей работе динамика была также ранее реконструирована для близлежащего района Северного Каспия по буровым колонкам ГС 194-08-01 и ГС 194-08-14 (Чеховская и др., 2018).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РНФ №24-77-00011. Авторы выражают глубокую благодарность к.г.н. Е.Е. Талденковой и иностранным коллегам за помощь в организации и проведении изотопно-кислородного анализа, а также ООО «Моринжгеология» за предоставленный буровой материал.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Лысенко Е.И., Ткач А.А., Макшаев Р.Р. и др. 2024. Палеоэкологические условия в предельтовом районе Северного Каспия в голоцене. Вестник Московского университета. Серия 5. География 79(1): 61-77. DOI: [10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.1.5)
- Николаев С.Д. 1995. Изотопная палеогеография внутриконтинентальных морей. Москва: ВНИРО.
- Чеховская М.П., Зенина М.А., Матуль А.Г. и др. 2018. Реконструкция палеобстановки в голоцене на Северном шельфе Каспийского моря по остракодам. Океанология 58(1): 89-101. DOI: [10.7868/S0030157418010094](https://doi.org/10.7868/S0030157418010094)
- Berdnikova A., Lysenko E., Makshaev R. et al. 2023. Multidisciplinary Study of the Rybachya Core in the North Caspian Sea during the Holocene. Diversity 15(2). DOI: [10.3390/d15020150](https://doi.org/10.3390/d15020150)
- Bezrodnykh Y.P., Sorokin V.M. 2016. On the age of the Mangyshlak deposits of the northern Caspian Sea. Quaternary Research 85(2): 245–254. DOI: [10.1016/j.yqres.2016.01.004](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2016.01.004)
- Tkach A.A., Tkach N.T., Zenina M.A. 2024. Stable oxygen isotopes in modern ostracods from the Caspian Sea. Journal of Paleolimnology. DOI: [10.1007/s10933-024-00321-3](https://doi.org/10.1007/s10933-024-00321-3)

Vegetation reconstruction based on a modelling approach applied to Holocene pollen records from Lakes Ladoga and Onega

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Vasilyeva A.V.^{1*}, Savelieva L.A.¹, Krikunova A.I.², Tarasov P.E.²

¹Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Universitetskaya Naberezhnaya 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia

²Institute of Geological Sciences, Palaeontology Section, Freie Universität Berlin, Malteserstraße 74–100, Building D, 12249, Berlin, Germany

ABSTRACT. Quantitative reconstruction of vegetation abundance utilising pollen records from Lake Ladoga, Lake Onega, and Lake Lembolovskoye in north-western Russia was conducted using the REVEALS model. Two modelling approaches, integrated with three sets of relative pollen productivities and fall speeds, produced divergent outcomes. The option that most accurately reflected the vegetation composition was selected for further analysis. The comparison of modern vegetation with sub-recent spectra from surface samples in the study region enabled an evaluation of the reliability of the model.

Keywords: quantitative reconstructions, REVEALS, sub-recent spectra, Lake Lembolovskoye, north-western Russia

For citation: Vasilyeva A.V., Savelieva L.A., Krikunova A.I., Tarasov P.E. Vegetation reconstruction based on a modelling approach applied to Holocene pollen records from Lakes Ladoga and Onega // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 718-725. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-718

1. Introduction

The reconstruction of vegetation and climate of the past is one of the most significant goals of pollen analysis, along with the determination of relative age. Quantitative reconstructions of vegetation based on palynological data are of particular interest. However, such studies encounter complexities, as the pollen-vegetation relationship is not linear, influenced by pollen productivity, pollen preservation, pollen transport methods and some other factors. Therefore, a comprehensive examination of surface soil and bottom samples, as well as the composition of modern vegetation, is crucial for each geographical focus area. The Holocene vegetation of the Lake Ladoga and Lake Onega regions is well-studied, resting on the results of pollen analysis of bog and lacustrine sediments (Arslanov et al., 1999; 2001; Elina et al., 2000; and many others), including the bottom sediments of Lakes Ladoga and Onega themselves (Delusin, 1991; Savelieva et al., 2019; Lavrova, 2004; Sapelko et al., 2021; Savelieva et al., 2023; and many others). However, studies of surface samples are scarce in the Lake Ladoga region (Malyasova, 1976; Chernova et al., 2006) and the northeastern Lake Onega region (Filimonova, 2005; Elina and Filimonova, 2007). Meanwhile, these studies are the basis for the interpretation of fossil spectra. Therefore, an important

research method may be the modelling of vegetation cover based on pollen data, as it solves several problems. At first, it provides quantitative data on vegetation and therefore excludes subjective interpretation of fossil spectra, which, at second, allows comparison of materials from different authors. One such model is REVEALS (Sugita, 2007), developed for regional vegetation reconstructions.

This paper presents the results of REVEALS modelling for the two largest lakes in Europe, Lakes Ladoga and Onega, as well as for the comparatively small Lake Lembolovskoye, located on the Karelian Isthmus. Surface soil samples were analysed to allow a more reliable interpretation of fossil pollen spectra, to expand the database of surface samples, and to verify the modelling outcomes. The results obtained were also compared with the composition of modern vegetation.

2. Materials and Methods

Fieldwork was conducted in August – September 2022 and involved sampling around Lakes Ladoga and Onega, covering the most diverse natural and anthropogenically influenced landscapes. A total of 60 samples were collected. One sample from the upper 5 cm of soil was taken in the centre of a 1 x 1 m plot. A

*Corresponding author.

E-mail address: aleksandra.vasilieva@spbu.ru (A.V. Vasilyeva)

Received: June 10, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



vegetation survey and a detailed description of plants within the plot were carried out, including the foliage projection cover in percentages. The Co1309 core from Lake Ladoga (Savelieva et al., 2019), the Sp0002 core from Lake Onega (Savelieva et al., 2023), and the Lembolovskoye core (Arslanov et al., 2001) were selected for the Holocene vegetation modelling; all of them were studied previously. The Holocene parts of the sediment cores were 1.99 m, 3.13 m, and 6.6 m, respectively. The samples were studied every 2 to 10 cm. Sample preparation followed the standard protocol (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986). The samples were microscopied using a Labomed-3 variant 2 microscope with 400× magnification.

The REVEALS (Regional Estimates of VEgetation Abundance from Large Sites) model is part of the LRA (Landscape Reconstruction Algorithm) and was developed for regional vegetation reconstructions (Sugita, 2007). The model is used for lakes larger than 1–5 km² and reconstructs the vegetation cover of an area of 10⁴–10⁵ km². The input parameters of the model are pollen counts, relative pollen productivities (RPPs), pollen fall speed (FSs, calculated according to Stoke's law), size (diameter) and type (lake or bog) of the basin, mean wind speed, and maximum range of the regional vegetation. The result of modelling is the percentages of areas occupied by different plant species or their corresponding pollen taxa. In this paper, we used two modelling approaches (Theuerkauf et al., 2016; Abraham et al., 2014), which are freely available. We also used three datasets of RPPs and FSs: a set of synthesised (averaged) values for the whole of Europe (Serge et al., 2023), a set of values obtained in separate regional studies from a long list of regions and taxa (Czech Republic, Slovakia, Estonia, Sweden, Norway; from the database of Wiczorek and Herzsuh, 2020), and the same values from a short list (Sweden, Estonia).

Lakes Ladoga and Onega are extremely large, and their areas are comparable to the range within which the REVEALS model reconstructs vegetation cover. Therefore, the relatively small Lake Lembolovskoye, with an area of about 20 km², was chosen to compare the modelling results. Additionally, land use and land cover (LULC) classification in ArcGIS was performed for the lake area (within a radius of 50 km).

3. Results and Discussion

The results of pollen analysis of surface samples were compared with the modern vegetation composition. It was shown that the spectra from soil samples to a greater extent reflect the features of local vegetation. The proportion of arboreal pollen in samples from forests is usually more than 80–90%. However, it is only 50–70% in samples from meadows and forests near settlements. The spectra are dominated by *Pinus* pollen. Its value exceeds 40% in half of the samples; in pine forests it reaches 70%. The content of *Picea* does not exceed 10%, even in spruce forests. The values of *Betula* sect. *Albae* in spruce and spruce and birch forests can reach 50–70%, although usually not exceeding 40%. These three taxa also represent the main forest-form-

ing species in the region. According to vegetation surveys, spruce, pine, and birch occur in an average ratio of 4:4:2, with pine being more common in the Lake Ladoga region and spruce in the Lake Onega region. Among herbaceous taxa, the Poaceae family is most represented. In samples from meadow communities, the content of this taxon reaches 10%–20%. In other samples, Poaceae values are generally ~1%. *Artemisia* pollen is present in almost all samples, although this species has not occurred at the surveyed sites. Ericales contents are typically ~0–2%, even though different Ericales plants are quite widely and frequently represented at the sampling sites.

Based on the results of the study of lake bottom sediments, percentage pollen diagrams were constructed. Pollen assemblage zones and climatostratigraphic periods were established according to the Blitt-Sernander sequence adapted for Northern Eurasia (Khotinsky, 1987).

A total of 6 modelling variants were performed for each lake. In our opinion, the best result is obtained using synthesised values of RPPs (Serge et al., 2023). The synthesised, i.e., averaged, values are calculated using data from different authors (Githumbi et al., 2022; Serge et al., 2023) and give a balanced result. Data from different individual studies, where slightly different techniques are used, may overestimate area percentages for some taxa and underestimate them for others. Speaking of the two model approaches, the algorithm proposed by Abraham et al. (2014) is preferred as the modelled percentages for plant species, yielded for the surface bottom sample, are closest to the actual composition of modern vegetation. For example, spruce and pine are almost equally represented in the regional vegetation. However, the results of the land use and land cover (LULC) classification for the Lake Lembolovskoye region are roughly comparable with the modelling results. According to REVEALS, the study area is dominated by pine, the total forest cover is 70–75%, whereas modern vegetation cover is dominated by spruce, and forests cover only 45% of the area within a 50-km radius of the lake.

The method we have chosen (Abraham et al., 2014) yields the following reconstruction. The Preboreal time is characterised by the dominance of herbaceous taxa, with open areas reaching 50–60%. Note that the model does not reconstruct how much area is occupied by vegetation and how much is not in the first place. Among trees, birch dominates (~30%). Among herbaceous plants, grasses and sedges prevail, and the latter predominates, especially within the basins of the large lakes. The areas of Lake Onega and Lake Ladoga are also characterised by the wide distribution of willow, although its share is minimal in the area of Lake Lembolovskoye. In our opinion, high percentages of willow and sedges may be a feature of large water bodies with their long shorelines, where these plants prefer to settle. In this case, their distribution in the region is overestimated by the model. Another inaccuracy is the presence of hazel and broad-leaved species. It is, however, explained by the findings of their single pollen grains, which are likely to be redeposited or of non-lo-

cal origin. In the Boreal period, pine dominates in all basins, reaching ~20% in the basins of the large lakes and 70% in the Lake Lembolovskoye area. The forest cover is close to the modern one, as shown by the ratio of arboreal to herbaceous species. During the Atlantic period, spruce propagates and reaches ~50% by the end of the period. In the areas of Lakes Ladoga and Lembolovskoye, elm (20%), linden (up to 10%), and hazel (5–10%) are present in the forests. The Onega region is characterised by a low percentage of broad-leaved species (less than 10% in total) and absolute dominance of spruce (up to 80%). During the Subboreal period, the presence of broad-leaved species decreases, and spruce dominates within all basins, occupying 60–80% of the area. Transitioning into the Subatlantic time, pine spreads again. Pine and spruce occupy the territory almost equally, so the reconstruction does not contradict the modern vegetation composition. Also at this time, the percentage of grasses, especially cereals, increases in the vegetation cover, which is usually associated with human impact.

4. Conclusions

The REVEALS modelling results reflect changes in vegetation composition in a more accurate way than classical percentages of pollen taxa. In addition, the model offers an independent interpretation of palynological data. Relative pollen productivities are a key parameter for modelling. The modelled percentages of areas occupied by different plant species strongly depend on the given RPP values. In our opinion, the model yields better results when using a database of synthesised data (Serge et al., 2023). The REVEALS algorithm presented by Abraham et al. (2014) also offers the most realistic area percentages. It is important that the model does not provide information on vegetation cover in absolute values. It may be crucial for reconstructions of the early Holocene, when vegetation cover was not continuous. A weakness of the model is that it does not take into account those taxa whose pollen may be redeposited or transported by wind over long distances. However, this may be indirectly indicated by pollen preservation and the ecological incompatibility of different species. Nevertheless, the REVEALS model is a real tool for quantitative vegetation reconstruction. Despite all the inaccuracies of the modelling, the results can be easily adjusted, even at the user level, if appropriate information on modern vegetation is available. Thus, the results of pollen analysis of surface samples serve as an auxiliary tool for model adjustment. In addition, their study is important for expanding databases, which are often used in quantitative vegetation and climate reconstruction.

Acknowledgements

The collection and analysis of surface samples were supported by the project 'Individual life histories in long-term culture change: Holocene hunter-gatherers in Northern Eurasia' (<https://baikalproject.artsrn.ualberta.ca/>).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Abraham V., Oušková V., Kuneš P. 2014. Present-Day Vegetation Helps Quantifying Past Land Cover in Selected Regions of the Czech Republic. *PLoS ONE* 9: 100–117. DOI: [10.1371/journal.pone.0100117](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100117)
- Arslanov K., Savelieva L.A., Klimanov V.A. et al. 2001. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in Northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 43: 545–558. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)
- Arslanov K., Saveljeva L.A., Gey N.A. et al. 1999. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of North-Western Russia during the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 41: 22–45. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)
- Berglund B. E., Ralska-Jasiewiczowa M. 1986. Pollen analysis and pollen diagram. In Berglund B. E. (Ed.): *Handbook of Holocene. Palaeoecology and Palaeohydrology*. New York, Wiley Interscience: 455–484. DOI: [10.1002/jqs.3390010111](https://doi.org/10.1002/jqs.3390010111)
- Chernova G.M., Denisenkov V.P., Lomova E.I. 2006. Subrecent spore-pollen spectra of the northwestern Ladoga region (on the example of the Ladoga educational and geographical base). *Vestnik SPbGU [Bulletin of St. Petersburg State University]* 1: 70–79. (in Russian)
- Delusin I. 1991. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and the vegetation history of its surroundings. *Academia Scientifica Fennica, Geologica-Geographica, Series A III* 153: 66 p.
- Elina G.A., Lukashov A.D., Yurkovskaya T.K. 2000. The Late Glacial and Holocene of Eastern Fennoscandia (paleovegetation and paleogeography). Petrozavodsk: Publishing House of the KSC RAS, 242 p. (in Russian)
- Elina G.A., Filimonova L.V. 2007. Paleovegetation of the Late Glacial-Holocene of Eastern Fennoscandia and problems of mapping. III Vserossiyskaya shkola-konferenciya 'Aktual'nye problemy geobotaniki' [III All-Russian school-conference "Current problems of geobotany"]. Petrozavodsk: KRC RAS, pp. 117–143. (in Russian)
- Filimonova L.V. 2005. Vegetation dynamics of the Middle Taiga Subzone of Karelia in the Late Glacial and Holocene (Paleoecological Aspects). PhD thesis, Institute of Biology, Karelian Scientific Center RAS, Petrozavodsk. (in Russian)
- Githumbi E., Fyfe R., Gaillard M.-J. et al. 2022. European Pollen-Based REVEALS Land-Cover Reconstructions for the Holocene: Methodology, Mapping and Potentials. *Earth Syst. Sci. Data* 14: 1581–1619. DOI: [10.5194/essd-14-1581-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-1581-2022)
- Khotinsky N.A. 1987. Radiocarbon chronology and correlation of natural and anthropogenic boundaries of the Holocene. *Novye dannye po geokhronologii chetvertichnogo perioda [New data on the geochronology of the Quaternary period]*. Moscow, Science: pp. 39–45. (in Russian)
- Lavrova N.B. 2004. Palynological description of bottom sediments of Lake Onega. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii [Geology and Mineral Resources of Karelia]* 7: 207–218. (in Russian)
- Malyasova E.S. 1976. Assessment of the degree of detail of phytocenological reconstructions based on the results of spore-pollen analysis of sediments of various genesis. *Severo-Zapad Evropejskoj chasti SSSR [North-West of the European part of the USSR]*, pp. 71–98. (in Russian)
- Sapelko T.V., Ludikova A.V., Kuznetsov D.D. et al. 2021. Reflection of climatic and anthropogenic changes of the Late Glacial and Holocene in bottom sediment cores of Lake Ladoga. In: Kondratieva S.A., Pozdnyakova S.R., Rumyantseva V.A. (Eds.), *Sovremennoe sostoyanie i problemy antropogen-*

noj transformacii ekosistemy Ladozhskogo ozera v usloviyah izmenyayushchegosya klimata [Current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in conditions of a changing climate]. Moscow: Institute of Lake Science, pp. 59–81. (in Russian)

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. 2019. Vegetation and climate changes during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. *Boreas* 48: 349–360. DOI: [10.1111/bor.12376](https://doi.org/10.1111/bor.12376)

Savelieva L.A., Ivanova A.V., Rybalko A.E. et al. 2023. New data on the biostratigraphy of late- and post-glacial sediments of Lake Onega. Periglacial Vostochno-Evrojskoj ravniny i Zapadnoj Sibiri. *Materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii [Periglacial of East European stability and Siberia. Materials of the All-Russian Scientific Conference]*, [Electronic edition], pp. 123–132. (in Russian) DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-069-0](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-069-0)

Serge M. A., Mazier F., Fyfe R. et al. 2023. Testing the Effect of Relative Pollen Productivity on the REVEALS Model: A Validated Reconstruction of Europe-Wide Holocene Vegetation. *Land* 12 (5), 986. DOI: [10.3390/land12050986](https://doi.org/10.3390/land12050986)

Sugita S. 2007. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. *The Holocene* 17(2): 229–241. DOI: [10.1177/0959683607075837](https://doi.org/10.1177/0959683607075837).

Theuerkauf M., Couwenberg J., Kuparinen A. et al. 2016. A matter of dispersal: REVEALSinR introduces state-of-the-art dispersal models to quantitative vegetation reconstruction. *Vegetation History and Archaeobotany* 25 (6): 541–553. DOI: [10.1007/s00334-016-0572-0](https://doi.org/10.1007/s00334-016-0572-0)

Wieczorek M., Herzschuh U. 2020. Compilation of relative pollen productivity (RPP) estimates and taxonomically harmonised RPP datasets for single continents and Northern Hemisphere extratropics. *Earth System Science Data* 12 (4): 3515–3528. DOI: [10.5194/essd-12-3515-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-3515-2020)

Реконструкция изменения растительности в голоцене по данным моделирования с использованием результатов спорово-пыльцевого анализа донных отложений Ладожского и Онежского озер

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYВасильева А.В.^{1*}, Савельева Л.А.¹, Крикунова А.И.², Тарасов П.Е.²¹Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, 7/9, Санкт-Петербург 199034, Россия²Институт геологических наук, Отдел палеонтологии, Свободный университет Берлина, Мальтезерштрассе, 74-100, корпус D, 12249, Берлин, Германия

АННОТАЦИЯ. Количественная реконструкция растительного покрова с использованием модели REVEALS выполнена на основе ископаемых спорово-пыльцевых спектров донных отложений Ладожского, Онежского и Лемболовского озер, расположенных на северо-западе России. Два варианта моделирования в сочетании с тремя наборами параметров относительной пыльцевой продуктивности и скоростей падения пыльцы показали разные результаты, среди них был выбран наиболее адекватно отражающий состав растительности. Сопоставление состава современной растительности с субрецентными спорово-пыльцевыми спектрами поверхностных проб из региона исследований позволило оценить качество модели.

Ключевые слова: количественные реконструкции, REVEALS, субрецентные спектры, озеро Лемболовское, северо-запад России

Для цитирования: Васильева А.В., Савельева Л.А., Крикунова А.И., Тарасов П.Е. Реконструкция изменения растительности в голоцене по данным моделирования с использованием результатов спорово-пыльцевого анализа донных отложений Ладожского и Онежского озер // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 718-725. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-718

1. Введение

Одной из важнейших целей спорово-пыльцевого анализа, наряду с определением относительного возраста, является реконструкция растительности и климата прошлого. Особый интерес представляют количественные реконструкции растительности, основанные на палинологических данных. Однако, такие исследования – сложная задача, так как зависимость между количеством обнаруженной ископаемой пыльцы и ее обилием в растительном покрове не линейна. Кроме того, на эту зависимость оказывают влияние пыльцевая продуктивность, сохранность пыльцы, способ ее переноса и некоторые другие факторы. Поэтому для понимания и решения таких задач необходимо изучать поверхностные почвенные и донные пробы, а также выявлять зависимость состава субрецентных спорово-пыльцевых спектров и структуры совре-

менной растительности для каждого изучаемого региона. Голоценовая растительность Приладожья и Прионежья относительно хорошо изучена и опирается на результаты палинологического анализа болотных и озерных отложений (Arslanov et al., 1999; 2001; Елина и др., 2000; и мн. др.), включая и донные отложения Ладожского и Онежского озер (Delusin, 1991; Savelieva et al., 2019; Лаврова, 2004; Сапелко и др., 2021; Савельева и др., 2023; и мн. др.). А вот исследования поверхностных образцов, являющихся основой для интерпретации ископаемых спектров, единичны на территории Приладожья (Малясова, 1976; Чернова и др., 2006) и северо-восточного Прионежья (Филимонова, 2005; Елина и Филимонова, 2007). По этим причинам, важным методом исследований может стать моделирование растительного покрова на основе спорово-пыльцевых данных, которое одновременно решает две задачи: дает количественные данные о

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: aleksandra.vasilieva@spbu.ru (А.В. Васильева)

Поступила: 10 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



растительности и исключает субъективную интерпретацию ископаемых спорово-пыльцевых спектров, тем самым позволяя сравнивать материалы разных авторов. Одной из таких моделей является REVEALS (Sugita, 2007), разработанная для региональных растительных реконструкций.

В данной работе представлены результаты моделирования REVEALS для двух крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского, а также для относительно небольшого Лемболовского озера, расположенного на Карельском перешейке. Для повышения достоверности интерпретации фоссильных спорово-пыльцевых спектров, пополнения базы данных и проверки результатов моделирования проанализированы поверхностные образцы почвы. Полученные результаты также сопоставлены с составом современной растительности.

2. Материалы и методы

Отбор поверхностных образцов выполнен в августе – сентябре 2022 года. Точки отбора проб расположены вокруг Ладожского и Онежского озер таким образом, чтобы охватить наиболее разнообразные естественные и нарушенные человеком ландшафты. Всего отобрано 60 проб. В центре площадки размером 1 x 1 м отбирался один образец из верхнего 5-см слоя почвы. Проводилось геоботаническое описание растительности в пределах видимости и детальное описание растительности на площадке, включая проективное покрытие каждого вида. Для моделирования растительности голоцена были выбраны колонка Co1309 донных отложений Ладожского озера (Savelieva et al., 2019), колонка Sp0002 из Онежского озера (Савельева и др., 2023) и колонка из Лемболовского озера (Arslanov et al., 2001), изученные ранее. Мощности голоценовых отложений в колонках составили соответственно 1,99 м, 3,13 м и 6,6 м. Спорово-пыльцевой анализ выполнен с шагом 2–10 см. Химическая обработка поверхностных проб выполнена по стандартной методике (Berglund and Ralska-Jasiewiczowa, 1986), микроскопирование образцов – при помощи микроскопа Лабомед-3 вариант 2 с 400-кратным увеличением.

Модель REVEALS (Regional Estimates of VEgetation Abundance from Large Sites) является частью алгоритма LRA (Landscape Reconstruction Algorithm) и разработана для региональных растительных реконструкций (Sugita, 2007). Модель подходит для озер площадью более 1–5 км² и реконструирует растительный покров территории в 10⁴–10⁵ км². Исходными параметрами модели являются пыльцевые насчеты, значения относительной пыльцевой продуктивности (relative pollen productivity, RPP), скорости падения пыльцы (fall speed, FS, рассчитываются по закону Стокса), диаметр и тип изучаемого объекта (озеро или болото), средняя скорость ветра и максимальный радиус распространения региональной растительности. Результат моделирования – процентные соотношения площадей, занимаемых различными видами растений

и соответствующими им пыльцевыми таксонами. В работе мы использовали два варианта модели, которые находятся в свободном доступе (Theuerkauf et al., 2016; Abraham et al., 2014), в сочетании с тремя наборами данных относительной пыльцевой продуктивности RPP и скоростей падения FS: набором синтезированных (осредненных) значений для всей Европы (Serge et al., 2023), набором результатов региональных исследований из расширенного списка регионов и таксонов (Чехия, Словакия, Эстония, Швеция, Норвегия; из базы Wiczorek and Hertzschuh, 2020) и теми же значениями из сокращенного списка (Швеция, Эстония).

Ладожское и Онежское озера – это крупные водоемы, чьи площади сравнимы с территорией, в пределах которой реконструируется растительный покров по модели REVEALS. Поэтому для сравнения результатов моделирования выбрано относительно небольшое озеро Лемболовское площадью около 20 км². С этой же целью для района озера (в пределах радиуса 50 км) была выполнена классификация почвенно-растительного покрова (land use and land cover, LULC) в ArcGIS.

3. Результаты и обсуждение

Сравнение результатов спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб и состава современной растительности на основе геоботанического описания показало, что спектры из почвенных проб отражают в большей степени особенности локальной растительности. Доля древесной пыльцы в образцах из сомкнутых лесов обычно составляет более 80–90%, но падает до 50–70% в пробах, отобранных на лугах и в лесах вблизи населенных пунктов. В спектрах преобладает пыльца *Pinus*, доля которой в половине образцов больше 40%, а в сосновых лесах – достигает 70%. Содержание *Picea* не превышает 10% даже в еловых лесах. Доля *Betula sect. Albae* в еловых и березово-еловых лесах может достигать 50–70%, хотя обычно не превышает 40%. Эти три таксона представляют основные лесообразующие породы в регионе. По данным геоботанических описаний ель, сосна и береза встречаются в среднем в соотношении 4:4:2, причем, в Ладожском регионе чаще встречается сосна, а в Онежском – ель. Из травянистых таксонов наиболее представлено семейство Poaceae. В образцах из луговых сообществ содержание этого таксона достигает 10%–20%, в остальных образцах Poaceae присутствует в количестве ~1%. Почти во всех образцах присутствует пыльца *Artemisia*, хотя полынь и не встречалась на описанных площадках. Пыльца Ericales в пыльцевых спектрах обычно составляет ~0–2%, несмотря на то, что верескоцветные были довольно широко и часто представлены в местах отбора образцов.

По результатам исследования донных отложений озер построены спорово-пыльцевые диаграммы, на которых выделены пыльцевые зоны и климато-стратиграфические периоды согласно схеме Блитта-Сернандера, адаптированной для Северной Евразии (Хотинский, 1987).

Всего выполнено 6 вариантов моделирования для каждого озера. На наш взгляд, наилучший результат дает использование синтезированных значений относительной пыльцевой продуктивности (Serge et al., 2023). Синтезированные, то есть осредненные, значения рассчитываются с использованием данных разных авторов (Githumbi et al., 2022; Serge et al., 2023) и дают сбалансированный результат. Данные разных отдельных исследований, полученные с использованием различных методик, могут показывать завышенные проценты площадей для одних таксонов и заниженные для других. Из двух вариантов модели предпочтение отдается алгоритму, предложенному Abraham et al. (2014), так как смоделированные для поверхностных донных образцов площади покрытия разных видов растений наиболее близки реальному составу современной растительности. Например, ель и сосна в выбранном нами варианте модели практически одинаково представлены в региональной растительности. Однако, результаты классификации почвенно-растительного покрова оз. Лемболовское лишь очень приблизительно сопоставляются с результатами моделирования. Согласно REVEALS в районе исследований преобладает сосна и облесенность составляет 70–75%, тогда как в современном растительном покрове доминирует ель, а леса занимают 45% территории в радиусе 50 км от озера.

Выбранный нами способ (Abraham et al., 2014) дает следующую реконструкцию. Пребореальное время характеризуется доминированием травянистых таксонов, доля открытых площадей достигает 50–60%. Необходимо помнить, что модель не дает информации о соотношении площадей, занятых какой-либо растительностью или свободных от нее. Среди древесных таксонов доминирует береза (~30%). Среди травянистых растений преобладают осоковые, особенно в районах крупных озер, и злаковые. Для районов Онежского и Ладожского озер также характерны высокие проценты площадей с зарослями ивы, но в районе Лемболовского озера ее доля минимальна. На наш взгляд, высокие доли ивы и осоковых могут быть особенностью крупных водоемов с их протяженными береговыми линиями, где эти растения предпочитают селиться. В таком случае, их смоделированные площади распространения в регионе завышены. Еще одна неточность реконструкции – присутствие лещины и широколиственных пород, что объясняется находками их пыльцевых зерен, которые, скорее всего, находятся во вторичном залегании или имеют заносное происхождение. В бореальное время во всех разрезах доминирует сосна, процент ее распространения достигает ~20% в крупных озерах и 70% в районе Лемболовского озера. Облесенность в это время близка современной, о чем свидетельствует соотношение древесных и травянистых. В атлантическое время растет доля ели, и к концу периода она составляет более 50%. В районах Ладожского и Лемболовского озер в лесах значительно участие вяза (20%), липы (до 10%) и лещины (5–10%). Прионежье же характеризуется низким процентом

широколиственных пород (менее 10%) и абсолютным доминированием ели (до 80%). В суббореальное время широколиственные породы начинают выпадать из состава растительности, в районе всех озер доминирует ель, доля которой достигает 60–80%. В субатлантическое время вновь распространяется сосна. Сосна и ель занимают примерно равные доли площадей; в этом реконструкция не противоречит структуре современной растительности. Также в это время растет доля трав в растительном покрове, особенно злаковых, что обычно связывается с антропогенным влиянием.

4. Заключение

Таким образом, результаты моделирования REVEALS более адекватно отражают изменения состава растительности, чем классические процентные соотношения пыльцевых таксонов. К тому же, модель предлагает независимую интерпретацию палинологических данных. Значения относительной пыльцевой продуктивности – это ключевой параметр для моделирования. От заданных значений сильно зависят смоделированные процентные соотношения площадей, приходящихся на различные виды растений. На наш взгляд, при использовании базы синтезированных данных модель дает более удачные результаты (Serge et al., 2023). Вариант алгоритма REVEALS, представленный Abraham et al. (2014), также предлагает наиболее реалистичные значения площадей. Важно, что модель не дает информации о растительном покрове территории в абсолютных значениях, что может быть критично для реконструкций раннего голоцена, когда растительный покров не был сплошным. Слабой стороной модели является то, что она не учитывает те таксоны, пыльца которых может находиться во вторичном залегании или занесена ветром. Однако, об этом может косвенно свидетельствовать сохранность пыльцы и экологическая несовместимость разных видов. Тем не менее, модель REVEALS – это реальный инструмент для количественных растительных реконструкций: несмотря на все допущения и неточности моделирования, результаты могут быть скорректированы даже на пользовательском уровне при наличии соответствующих сведений о современной растительности. Так, вспомогательными материалами при корректировке модели служат результаты спорово-пыльцевого анализа поверхностных проб. К тому же, их изучение важно для пополнения баз данных, которые часто используются в количественных реконструкциях растительности и климата.

Благодарности

Сбор и анализ поверхностных проб осуществлялся при поддержке проекта «Individual life histories in long-term culture change: Holocene hunter-gatherers in Northern Eurasia» (<https://baikalproject.artsrn.ualberta.ca/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Елина Г.А., Лукашов А.Д., Юрковская Т.К. 2000. Позднеледниковье и голоцен восточной Фенноскандии (палеорастиельность и палеогеография). Петрозаводск, Издательский дом КарНЦ РАН: 242 с.

Елина Г.А., Филимонова Л.В. 2007. Палеорастиельность позднеледниковья–голоцена Восточной Фенноскандии и проблемы картографирования. В: Кутенков С.А., Сони́на А.В., Тимофеева В.В. (ред.), Актуальные проблемы геоботаники. III Всероссийская школа-конференция. Петрозаводск, КарНЦ РАН: сс. 117–143.

Лаврова Н.Б. 2004. Палинологическая характеристика донных отложений Онежского озера. Геология и полезные ископаемые Карелии 7: 207–218.

Малясова Е.С. 1976. Оценка степени детальности фитоценологических реконструкций по результатам спорово-пыльцевого анализа осадков различного генезиса. Северо-Запад Европейской части СССР, сс. 71–98.

Савельева Л.А., Иванова А.В., Рыбалко А.Е. и др. 2023. Новые данные по биостратиграфии поздне- и послеледниковых отложений Онежского озера. Перигляциал Восточно-Европейской равнины и Западной Сибири. Материалы Всероссийской научной конференции [Электронное издание], сс. 123–132. DOI: [10.15356/periglacial978-5-89658-069-0](https://doi.org/10.15356/periglacial978-5-89658-069-0)

Сапелко Т.В., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д. и др. 2021. Отражение климатических и антропогенных изменений позднеледниковья и голоцена в колонках донных отложений Ладожского озера. В: Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Румянцева В.А. (ред.), Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата. Москва, Институт озероведения СПб ФИЦ РАН, сс. 59–81.

Филимонова Л.В. 2005. Динамика растительности среднетаежной подзоны Карелии в позднеледниковье и голоцене (палеоэкологические аспекты). Дис... канд. биол. наук, Институт биологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск.

Хотинский Н.А. 1987. Радиоуглеродная хронология и корреляция природных и антропогенных рубежей голоцена. Новые данные по геохронологии четвертичного периода. Москва, Наука: сс. 39–45.

Чернова Г.М., Денисенков В.П., Ломова Е.И. 2006. Субрецентные спорово-пыльцевые спектры северо-западного Приладожья (на примере Ладожской учебно-географической базы). Вестник СПбГУ 1: 70–79.

Abraham V., Oušková V., Kuneš P. 2014. Present-Day Vegetation Helps Quantifying Past Land Cover in Selected Regions of the Czech Republic. PLoS ONE 9: 100–117. DOI: [10.1371/journal.pone.0100117](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100117)

Arslanov K., Savelieva L.A., Klimanov V.A. et al. 2001. New data on chronology of landscape-paleoclimatic stages in Northwestern Russia during the Late Glacial and Holocene. Radiocarbon 43: 545–558. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)

Arslanov K., Saveljeva L.A., Gey N.A. et al. 1999. Chronology of vegetation and paleoclimatic stages of North-Western Russia during the Late Glacial and Holocene. Radiocarbon 41: 22–45. DOI: [10.1017/S0033822200041230](https://doi.org/10.1017/S0033822200041230)

Berglund B.E., Ralska-Jasiewiczowa M. 1986. Pollen analysis and pollen diagram. In Berglund B. E. (Ed.): Handbook of Holocene. Palaeoecology and Palaeohydrology. New York, Wiley Interscience: 455–484. DOI: [10.1002/jqs.3390010111](https://doi.org/10.1002/jqs.3390010111)

Delusin I. 1991. The Holocene pollen stratigraphy of Lake Ladoga and the vegetation history of its surroundings. Academia Scientifica Fennica, Geologica-Geographica, Series A III 153: 66 p.

Githumbi E., Fyfe R., Gaillard M.-J. et al. 2022. European Pollen-Based REVEALS Land-Cover Reconstructions for the Holocene: Methodology, Mapping and Potentials. Earth Syst. Sci. Data 14: 1581–1619. DOI: [10.5194/essd-14-1581-2022](https://doi.org/10.5194/essd-14-1581-2022)

Savelieva L.A., Andreev A.A., Gromig R. et al. 2019. Vegetation and climate changes during the Lateglacial and Holocene inferred from the Lake Ladoga pollen record. Boreas 48: 349–360. DOI: [10.1111/bor.12376](https://doi.org/10.1111/bor.12376)

Serge M.A., Mazier F., Fyfe R. et al. 2023. Testing the Effect of Relative Pollen Productivity on the REVEALS Model: A Validated Reconstruction of Europe-Wide Holocene Vegetation. Land 12 (5), 986. DOI: [10.3390/land12050986](https://doi.org/10.3390/land12050986)

Sugita S. 2007. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. The Holocene 17(2): 229–241. DOI: [10.1177/0959683607075837](https://doi.org/10.1177/0959683607075837)

Theuerkauf M., Couwenberg J., Kuparinen A. et al. 2016. A matter of dispersal: REVEALSinR introduces state-of-the-art dispersal models to quantitative vegetation reconstruction. Vegetation History and Archaeobotany 25 (6): 541–553. DOI: [10.1007/s00334-016-0572-0](https://doi.org/10.1007/s00334-016-0572-0)

Wieczorek M., Herzsuh U. 2020. Compilation of relative pollen productivity (RPP) estimates and taxonomically harmonised RPP datasets for single continents and Northern Hemisphere extratropics. Earth System Science Data 12 (4): 3515–3528. DOI: [10.5194/essd-12-3515-2020](https://doi.org/10.5194/essd-12-3515-2020)

Reconstruction of paleoecological and paleofire dynamics of the Tobol areas based on materials from lake-swamp deposits of Oskino

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYTrubitsyna E.D.¹, Ryabogina N.E.², Zelenkova R.R.¹¹Tyumen Scientific Centre Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina Str., 86, Tyumen, 625026, Russia²University of Gothenburg, box 200, 405 30 Gothenburg, Sweden

ABSTRACT. The paper compares palaeoecological, archaeological and palaeo-fire data from lake-swamp deposits of the Tobol river region, obtained as a result of the study of the Oskino wetland lake. The dependence of palaeofire dynamics on human economic activity and climate-induced changes in plant communities is analysed. The reconstruction covers 9.6 ka, including the entire period of occupation of the area, as well as the end of the Greenlandian stage and the beginning of the Northgrippian stage. Comparison of pollen data, concentration of macroscopic charcoal particles in lake-swamp sediments showed a correlation between decreasing moisture levels, increasing conifer proportion in forest composition and increasing fire frequency. It has been established on the vegetation anthropogenic influence was little (pollen data) partly due to this is related to the orientation population towards an appropriate type of economy up to 4.5 ka BP. The palynological data not show significant changes in the residential landscape or an increase in the frequency of fires in connection with the emergence of livestock breeding in the Late Bronze Age. In the Early Iron Age, semi-nomadic livestock breeding was formed the population probably did not need to burn forests for grazing, so the intensity of fires did not increase.

Keywords: palaeoecology, Tobol basin, charcoal analysis, forest paleofire dynamics, archaeology, Holocene

For citation: Trubitsyna E.D., Ryabogina N.E., Zelenkova R.R. Reconstruction of paleoecological and paleofire dynamics of the Tobol areas based on materials from lake-swamp deposits of Oskino // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 726-732. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-726

1. Introduction

Reconstruction of vegetation and natural-climatic changes in the forest-steppe areas of Tobol (south-western part of Western Siberia) was first performed on the materials of lacustrine and peat deposits of Oskino-09, located near the confluence of the Iset River into the Tobol, covering about 7.5 ka BP (Yuzhanina et al., 2022) and for the interval 9.6-7.5 ka BP on the data of Lake Kyrtym, located near the Andreevskoe Lake System (Ryabogina et al., 2020). A number of studies of soil samples from the cultural layer by pollen analysis were also carried out on the territory of the Tobol areas, which allowed to reconstruct the features of the anthropogenically modified landscape by means of economic activity (Holocene Landscapes..., 2008; Zakh et al., 2014; Zimina et al., 2009; Matveeva et al., 2018; Nasonova and Rudaya, 2016; Ryabogina and Ivanov, 2013; Ryabogina et al., 2015; 2018; Tsembalyuk et al., 2009; 2011).

One of the key issues in vegetation cover change is the effect of fire on vegetation, which has not been studied by researchers in this area. The aim of our study was to compare landscape-climatic reconstruction data with anthropogenic influences and the fire situation of the Tobol areas.

2. Materials and methods

In order to count the charcoal particles in a special metal box without disturbing the stratigraphic structure, a core was taken from Oskino-21 (56°36'31.92 'N, 66°15'34.82 'E), located in the Ingalskaya Dolina - an archaeological district with a large number of multi-temporal settlements (Volkov, 2007). The total length of the core is 193 cm and samples were taken every cm. Seven radiocarbon dates were obtained from the same core, dated in the Laboratory of Cenozoic Geology, Palaeoclimatology and Mineralogical Indicators.

*Corresponding author.

E-mail address: el.yuzh@gmail.com (E.D. Trubitsyna)

Received: June 02, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Each sediment sample of 1 cm³ volume was prepared according to a standard protocol (Mooney and Tinner, 2001): the samples were with 10% calcium hypochlorite solution (Ca(ClO)₂), and left in the dark for 24 hours.

After 24 hours, when the organic matter had completely discoloured, the sludge was poured with 10% HCl to dissolve the calcium salts (Ca), the samples were washed through a 100 micron sieve and any charcoal particles remaining on the sieve were counted under a microscope at 40x magnification.

Statistical processing, the obtained data of the concentration of macroscopic charcoal particles in peat were carried out in the programme CharAnalysis (Higuera, 2009), in the R environment (R Core Team, 2017), the package tapas (Finsinger and Bonnici, 2022) was used for plotting. The initial data for analysis were the number of charcoal particles in each sample, the depth, and the upper and lower age limits of each sample. The age was calculated using the Bhron age-depth model (Haslett and Parnell, 2008). The smoothing curve *rob.lowess*, smoothing window size 1000, interpolation of values was chosen with a step of 50 years. The established range of SNI values for the core is higher than three, which confirms the reliability of the obtained results (Kelly et al., 2011).

3. Results and discussion

At the local level, 29 fire episodes have been recorded using macroscopic charcoal analysis data (Fig.1).

Vegetation reconstruction for the interval 9.5-8.2 ka BP shows that pine begins to actively spread across the landscape, replacing birch in the forests (Ryabogina et al., 2020). At that time, the intervals between fire events were no more than 300 years. High fire background values were observed. It is likely that the frequency and severity of fire events and the general dynamics of background values are related to the dominance of pine in the stand, which is a fire resistant species and associated with high frequency of fires (Goldammer and Furyaev, 1996). For the interval 8.2-7.5 ka BP, no fire events are recorded, birch forests

dominate the vegetation, and moisture levels increase (Ryabogina et al., 2020).

The interval 7.5-4.6 ka BP is characterised by warm and insufficiently humid conditions, open areas with meadow-steppe vegetation predominate in the landscapes, and small birch and pine riverine forests are present (Yuzhanina et al., 2022). At this time, Neolithic, Chalcolithic and Early Bronze Age cultures are found in the settlements closest to the bog (Volkov, 2007), but neither pollen markers nor NPP markers indicate active human influence, probably due to the appropriating economy of the population (Yuzhanina et al., 2022). Two fire events are recorded at the beginning of the interval (7.5-6.0 ka BP), background fire values are low, most likely due to the small population living in the area and the dominance of meadow-steppe vegetation. However, from 6.0 ka BP there is an increase in conifer species and from 5.9 to 4.6 ka BP the frequency of fire episodes increases, possibly influenced by an increase in the proportion of forest with increasing boreal species in its composition, suggesting drier conditions (Yuzhanina et al., 2022). In general, despite the fact that the interval 7.5-4.6 ka BP is all quite dry and warm, fires are only observed at the time of an increase in the proportion of conifers in the forest composition.

Around 4.7-2.9 ka BP, the proportion of forest in the vegetation increases, mainly at the expense of birch, the moisture level increases, warm climatic conditions persist and the transformation of the lake into a bog is completed (Yuzhanina et al., 2022). Livestock breeding appeared around 4.5 ka BP. The population of the settlement of Oskino Boloto (near the Oskino peat bog) during the Late and Middle Bronze Age had moved away from the shoaled lake towards the floodplain, thus reducing the occurrence of palynological markers of economic activity (Yuzhanina et al., 2022). There are only two local fires. The background level is decreasing, probably due to the distance of the settlement from the bog.

In the interval 2.9-1.9 ka BP, the proportion of coniferous species in forests increased, but the landscape basis of was on grasslands of cereal-grass composition. There is cooling and a decrease in moisture

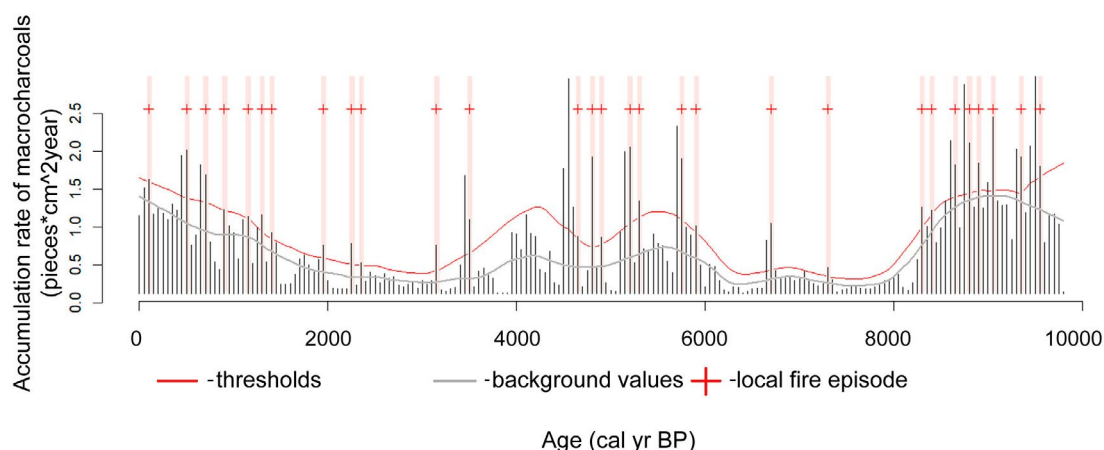


Fig.1. Accumulation rate of macroscopic charcoal particles and distribution of local pyrogenic episodes in the Oskino peat bog.

content (Yuzhanina et al., 2022). At the beginning of the Early Iron Age there was a the reorganisation of the economy, with the emergence of semi-nomadic livestock breeding, which may have influenced the longer existence of open landscapes as forest growth and undergrowth were used to feed cattle. There are three local fire episodes. The background curve of pyrogenic events rises slightly at the end of the interval. The low level of pyrogenic activity is probably also related to the distance of dwellings from the water and the prevalence of meadows in the landscape.

At the beginning of 1.9 ka BP a complete reorganisation of the vegetation takes place and the appearance of the territory is formed by birch forests with the participation of pine, cooling continues and climate humidity increases (Yuzhanina et al., 2022). From 1.4 ka BP, the number of fire episodes increases, the interval between them shortens and the frequency increases. The increase in palaeofire is associated with both growth anthropogenic pressure, a general increase in the forest cover of landscapes, and a raise in the proportion of pine in the stand.

4. Conclusions

Based on the set of data obtained for the territory of the Tobol areas, it has been possible to trace the relationship between vegetation transformations and palaeofire dynamics. The increase in palaeofires is associated with an increase in pine in the forest composition, probably an anthropogenic influence on fire dynamics was only in the last 500 years.

Acknowledgements

The present work was funded by Russian Science Foundation, No. 23-27-00437.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Finsinger W., Bonnici I. 2022. Tapas: an R package to perform trend and peaks analysis. Zenodo, DOI:[10.5281/zenodo.6344463](https://doi.org/10.5281/zenodo.6344463)
- Goldammer J. G., Furyaev V. V. 1996. Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia: Ecological Impacts and Links to the Global System, in: *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia*. Forestry Sciences 48: DOI: [10.1007/978-94-015-8737-2_1](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8737-2_1)
- Haslett J., Parnell A.A. 2008. Simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics* 57 (4): 399–418. DOI: [10.1111/j.1467-9876.2008.00623.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2008.00623.x)
- Higuera P. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Montana State University: Bozeman.
- Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M., et al. 2011. Signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment – charcoal records. *Quaternary Research* 75 (1):11–17.
- Landscapes and Cultural Interactions in the Tobol-Ishim basin during the Holocene. 2008. In: Molodin V.I.(Ed.). Novosibirsk: Nauka. (In Russian)
- Matveeva N.P., Zelenkov A.S., Riabogina N.E. et al. 2018. Gilevskii-2 kurgannyi mogil'nik. In: *AB Origine: Arkheologo-etnograficheskii sbornik*, 44–72 (In Russian)
- Mooney S., Tinner W. 2001. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat* 7: 1–18.
- Nasonova E.D., Rudaya N.A. 2016. Palynological method as a way of stratification of archeological objects: Case study Os'kino Boloto. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, (1), 93–100. (In Russian)
- R Core Team. 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ryabogina N.E., Afonin A.S., Ivanov S.N. 2020. Late Glacial and Holocene in the south of Western Siberia: geochemical indices and pollen data in Kyrtyma Lake sediments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 438. DOI [10.1088/1755-1315/438/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012023)
- Ryabogina N.E., Ivanov S.N. 2013. Reconstruction of landscapes' look in the low Tobol basin in the Early Middle Ages (by results of spore-and-pollen analysis of buried soil from Ustyug-1 burial ground). *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, 20(1), 133–138. (In Russian)
- Ryabogina N.E., Ivanov S.N., Afonin A.S. 2015. New data on the habitat of Transural population in the Early Middle Ages. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, 30(3), 170–176. (In Russian)
- Tsembalyuk S.I., Ilyushina V.V., Ryabogina N.E., et al. 2011. An integrated study of the Baitovo fortified settlement of Borovuska 2 (forest-steppe Low Tobol basin). *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, 15(2), 98–107. (In Russian)
- Tsembalyuk S.I., Zimina O.Yu., Ryabogina N.E., et al. 2009. Investigation of Chechkino 4 settlement in Yarkovo district of Tyumen region. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (11), 54–66. (In Russian)
- Volkov E.N. 2007. The complex of archaeological sites in Ingal Valley. Zakh V.A. (Ed.) Novosibirsk: Nauka. (In Russian)
- Yuzhanina E.D., Ivanov S.N., Afonin A.S. et al. 2022. Mid to late Holocene paleoenvironmental changes in the southern forest border of Western Siberia inferred from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 588: 110800. DOI:[10.1016/j.palaeo.2021.110800](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110800)
- Zakh V.A., Kostomarov V.M., Ilyushina V.V. et al. 2014. The Koptiyaki complex from the settlement of Chepkoul 5. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (1), 36–49. (In Russian)
- Zimina O.Yu., Volkov E.N., Ryabogina N.E. et al. 2009. New data on the Early and Late Bronze Age in Tyumen Low Tobol basin (basing on the settlement of Mostovoye 1 investigation results). *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (10), 20–34. (In Russian)

Реконструкция палеоэкологической и палеопожарной динамики Притоболья по материалам озерно-болотных отложений Оськино

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYТрубицына Э.Д.^{1*}, Рябогина Н.Е.², Зеленкова Р.Р.¹¹Тюменский научный центр СО РАН, ул. Малыгина 86, Тюмень, 625026, Россия²Гётеборгский университет, box 200, 405 30 Göteborg, Швеция

АННОТАЦИЯ. В работе сопоставлены палеоэкологические, археологические и палеопожарные данные из озерно-болотных архивов Притоболья, полученные в результате исследования заболоченного озера Оськино. Проанализирована зависимость палеопожарной динамики от хозяйственной деятельности человека и климатообусловленной трансформацией растительных сообществ. Реконструкция охватывает 9.6 тыс. лет, включая весь период заселения данной территории, а также финал грендландского и начало северогриппианского ярусов. Сопоставление пыльцевых данных, концентрации макроскопических частиц древесного угля в озерно-болотных отложениях показало зависимость между снижением уровня влажности, увеличением доли хвойных пород в составе леса и повышением частоты пожаров. Установлено незначительное антропогенное влияние на растительность (спорово-пыльцевые данные), отчасти в связи с ориентацией на при-сваивающий тип экономики вплоть до 4.5 тыс. л.н. Палинологические данные не фиксируют значительных перестроек жилого ландшафта или увеличения частоты пожаров и с появлением придомного скотоводства в позднем бронзовом веке. В раннем железном веке появилось полукочевое крупностадное скотоводство, и у населения, вероятно, также не было необходимости в выжигании леса для пастбищ в следствие чего интенсивность пожаров не возросла.

Ключевые слова: палеоэкология, Притоболье, частицы макроскопического угля, палеопожарная динамика, археология, голоцен

Для цитирования: Трубицына Э.Д., Рябогина Н.Е., Зеленкова Р.Р. Реконструкция палеоэкологической и палеопожарной динамики Притоболья по материалам озерно-болотных отложений Оськино // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 726-732. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-726

1. Введение

Реконструкция растительности и природно-климатических изменений лесостепного Притоболья (юго-западная часть Западной Сибири) впервые была выполнена на материалах озерно-болотных отложений Оськино-09, расположенного недалеко от впадения р. Исеть в р. Тобол, охватывающих около 7.5 тыс. лет (Yuzhanina et al., 2022), а для интервала 9.6-7.5 тыс. л.н. по данным озера Кыртыма, расположенного недалеко от системы Андреевских озер (Ryabogina et al., 2020). На территории Притоболья также была проведена серия исследований почвенных проб из культурного слоя спорово-пыльцевым анализом, что позволило восстановить особенности антропогенно-изменного ландшафта в результате хозяйственной деятельности (Ландшафты голоцена..., 2008; Зах и др., 2014;

Зими́на и др., 2009; Матвеева и др., 2018; Насонова и Рудая, 2015; Рябогина и Иванов, 2013; Рябогина и др., 2015; 2018; Цембалюк и др., 2009; 2011).

Однако одним из ключевых моментов в трансформации растительного покрова является влияние пожаров на растительность, что не изучалось исследователями на данной территории. Сопоставление данных ландшафтно-климатической реконструкции с антропогенным влиянием и пожарной ситуацией в Притоболье стало целью нашего исследования.

2. Материалы и методы

Для подсчета макрочастиц древесного угля в специальный металлический короб без нарушения структуры напластований был отобран керн Оськино-21 (56°36'31.92»N, 66°15'34.82»E), лока-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: el.yuzh@gmail.com (Э.Д. Трубицына)

Поступила: 02 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



лизованный в районе Ингальской долины – археологический микрорайон с большим количеством разновременных памятников (Волков, 2007). Общая мощность отложений составила 193 см, пробы отобраны в каждом см. Было получено семь радиоуглеродных дат из этого же керна, датирование выполнено в Лаборатория геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата.

Каждый образец отложений объемом 1 см³ был подготовлен согласно стандартному протоколу (Mooney and Tinner, 2001): пробы были залиты 10% раствором гипохлорита кальция (Ca(ClO)₂), оставлены в темном месте на 24 часа. Через сутки, когда органика полностью обесцветилась, осадок, заливался 10% HCl для растворения солей кальция (Ca), и после образцы промывали через сито 100 микрон и все частицы угля, оставшиеся на сите подсчитывали под микроскопом при 40-кратном увеличении.

Статистическая обработка, полученных данных концентрации макроскопических частиц угля в торфе осуществлялась в программе CharAnalysis (Higuera, 2009), в среде R (R Core Team, 2017), при построении использовался пакет *tapas* (Finsinger and Bonnici, 2022). Исходными данными для анализа выступило количество угольных частиц в образцах, глубина, верхняя и нижняя граница возраста каждого образца, рассчитанные в программе *Bhron* по модели возраст-глубина (Haslett and Parnell, 2008). Для расчета фоновых значений скорости накопления угля была выбрана сглаживающая кривая *rob. lowess*, сглаживающее окно размером 1000, интерполяция значений была выбрана с шагом 50 лет, установленный диапазон значений SNI для керна выше трех, что подтверждает достоверность полученных результатов (Kelly et al., 2011).

3. Результаты и их обсуждение

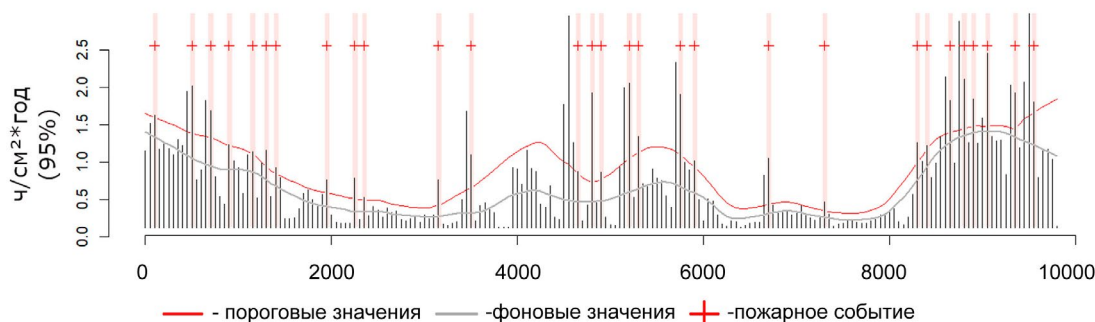
По данным макроскопических частиц угля удалось зафиксировать 29 пожарных эпизодов на локальном уровне (Рис.1.)

Наибольшая концентрация пожарных собы-

тий приходится на время 9.6-8.3, 5.9-4.6, 0.1-1.5 тыс. л.н. Единичные пожарные эпизоды фиксируются около 6.7, 7.3, 3.5, 3.1 тыс. л.н.

Реконструкция растительности для интервала 9.5-8.2 тыс. л.н. показывает, что сосновые леса начинают активно расселяться в ландшафте вытесняя березовые (Ryabogina et al., 2020). В это время межпожарные интервалы пожарных событий составляют не более 300 лет, наблюдаются высокие значения фоновых показателей пожаров. Вероятно, частота и сила пожарных событий, общая динамика фоновых значений связана с доминированием сосны в древостое, которая является огнеустойчивой породой и связана с высокой ретрансляцией пожаров (Goldammer and Fyryaev, 1996). Для промежутка 8.2-7.5 тыс. л.н. не фиксируются пожарные события, в растительности преобладают березовые леса, уровень увлажнения возрастает (Ryabogina et al., 2020).

Интервал 7.5-4.6 тыс. л.н. характеризуется теплыми и недостаточно влажными условиями, в ландшафтах преобладают открытые участки с лугово-степной растительностью, присутствуют небольшие придолинные березово-сосновые леса (Yuzhanina et al., 2022). В это время на ближайших к торфянику памятниках встречаются находки неолитических, энеолитических и раннебронзовых культур (Волков, 2007), однако не пыльцевые маркеры, не NPP не отмечают активное влияние человека, вероятно, это связано с присваивающим типом хозяйства у населения (Yuzhanina et al., 2022). В начале интервала (7.5-6.0 тыс. л.н.) фиксируется два пожарных события, фоновые пожарные значения низкие, скорее всего, это связано с небольшим количеством населения, проживающим на территории, и доминированием лугово-степной растительности. Однако с 6.0 тыс. л.н. наблюдается увеличения хвойных пород и начиная с 5.9 по 4.6 тыс. л.н. частота пожарных эпизодов увеличивается, возможно, на это повлияло увеличение доли леса с возрастанием бореальных видов в его составе, что говорит о более сухих условиях (Yuzhanina et al., 2022). В целом, несмотря на то, что интервал 7.5-4.6 тыс. л.н. весь достаточно сухой и теплый, пожары наблюдаются только в момент увеличения



Кал. л.н.

Рис.1. Скорость аккумуляции макроскопических частиц угля и распределение локальных пирогенных эпизодов торфяника Оськино.

доли хвойных пород в составе леса.

Около 4.7-2.9 тыс. л.н. происходит увеличение доли леса в растительности, в основном за счет березы, уровень увлажнения повышается, сохраняются теплые климатические условия, завершается трансформация озера в болото (Yuzhanina et al., 2022). Появление придомного скотоводства происходит около 4.5 тыс. л.н. Жители поселения Оськино Болото, (близлежащего к торфянику), в период позднего и развитого бронзового века уходят от обмелевшего озера в сторону поймы, поэтому встречаемость палинологических маркеров хозяйственной деятельности снижается (Yuzhanina et al., 2022). Пирогенных событий всего два, фоновые значения снижаются, вероятно, это связано с отдалением поселения от водоёма.

В интервале 2.9-1.9 тыс. л.н. увеличивается доля хвойных пород в лесах, однако основой ландшафта оставались луга злаково-разнотравного состава. Начинается похолодание и уменьшается увлажнение (Yuzhanina et al., 2022). В начале раннего железного века наблюдается перестройка хозяйства – появляется полукочевое скотоводство, которое возможно повлияло на более продолжительное существование открытых ландшафтов, когда лесной прирост и подлесок скармливали скоту. Пожарных эпизода три, кривая фоновых значений пирогенных событий незначительно поднимается в конце интервала. Возможно низкий уровень пирогенной активности, также связан с удаленным расположением жилищ от водоема и превалированием лугов в ландшафте.

Начиная с 1.9 тыс. л.н. происходит полная перестройка растительности и облик территории формируется березовыми лесами с участием сосны, продолжается похолодание, увеличивается увлажненность климата (Yuzhanina et al., 2022). Начиная с 1.4 тыс. л.н. возрастает количество пожарных событий, сокращается интервал между ними, частота увеличивается. Увеличение палеопожаров связано как с усилением антропогенной нагрузки, общим увеличением лесистости ландшафтов, и с возрастанием доли сосны в древостое.

4. Выводы

Благодаря комплексу, полученных данных для территории Притоболья, удалось проследить взаимосвязь между растительными трансформациями и палеопожарной динамикой. Увеличение количества пожарных событий связано с повышением численности сосны в составе лесов, вероятно, антропогенное влияние на пожарную динамику присутствует только последние 500 лет.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-27-00437 «Ретроспективная динамика лесных пожаров Западной Сибири: влияние природных и антропогенных факторов на южной границе леса».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- Волков Е.Н. 2007. Комплекс археологических памятников Ингальская долина. Зах В.А. (Ред.). Новосибирск: Наука.
- Зах В.А., Костомаров В.М., Илюшина В.В. и др. 2014. Коптяковский комплекс поселения Чепкуль 5. Вестник археологии, антропологии и этнографии 1 (24): 36–49.
- Зими́на О.Ю., Волков Е.Н., Рябогина Н.Е. и др. 2009. Новые материалы ранней и поздней бронзы в Тюменском Притоболье (по результатам исследования поселения Мостовое 1). Вестник археологии, антропологии и этнографии 10: 20–34.
- Ландшафты голоцена и взаимодействие культур в Тоболо-Ишимском междуречье. 2008. Молодин В.И. (Ред.). Новосибирск: Наука.
- Матвеева Н.П., Зеленков А.С., Рябогина Н.Е. и др. 2018. Гилевский-2 курганный могильник. АВ Origine: Археолого-этнографический сборник: 44–72.
- Насонова Э.Д., Рудая Н.А. 2015. Природные условия обитания человека в Притоболье: от неолита до средневековья (по материалам поселения Оськино Болото). Известия ИрГУ. Сер. Геоархеология. Этнология. Антропология 13: 96–105.
- Рябогина Н.Е., Иванов С.Н. 2013. Реконструкция облика ландшафтов Притоболья в раннем средневековье (по результатам спорово-пыльцевого анализа погребенной почвы могильника Устюг-1). Вестник археологии, антропологии и этнографии 1(20): 133–138.
- Рябогина Н.Е., Иванов С.Н., Афонин А.С. 2015. Новые данные о среде обитания населения Зауралья в начале средневековья. Вестник археологии, антропологии и этнографии 3 (30): 170–176.
- Рябогина Н.Е., Иванов С.Н., Насонова Э.Д. 2018. Жилой ландшафт: Природное окружение поселений позднего бронзового века в Притоболье. Вестник археологии, антропологии и этнографии 4 (43): 39–50. DOI: [10.20874/2071-0437-2018-43-4-039-050](https://doi.org/10.20874/2071-0437-2018-43-4-039-050)
- Цембалюк С.И., Зими́на О.Ю., Рябогина Н.Е. и др. 2009. Исследования поселения Чечкино 4 в Яковском районе Тюменской области. Вестник археологии, антропологии и этнографии 11: 54–66.
- Цембалюк С.И., Илюшина В.В., Рябогина Н.Е. и др. 2011. Комплексное исследование баитовского городища Боровушка 2 (лесостепное Притоболье). Вестник археологии, антропологии и этнографии 2(15): 98–107.
- Finsinger W., Bonnici I. 2022. Tapas: an R package to perform trend and peaks analysis. Zenodo, DOI:[10.5281/zenodo.6344463](https://doi.org/10.5281/zenodo.6344463)
- Goldammer J. G., Furyaev V. V. 1996. Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia: Ecological Impacts and Links to the Global System, in: Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia. Forestry Sciences 48. DOI: [10.1007/978-94-015-8737-2_1](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8737-2_1)
- Haslett J., Parnell A. A. 2008. Simple monotone process with application to radiocarbon-dated depth chronologies. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics 57(4): 399–418. DOI: [10.1111/j.1467-9876.2008.00623.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9876.2008.00623.x)
- Higuera P. 2009. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Montana State University: Bozeman.
- Kelly R.F., Higuera P.E., Barrett C.M. et al. 2011. Signal-to-noise index to quantify the potential for peak detection in sediment – charcoal records. Quaternary Research 75 (1):11–17.

Mooney S., Tinner W. 2001. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat* 7: 1–18.

R Core Team. 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Ryabogina N.E., Afonin A.S., Ivanov S.N. 2020. Late Glacial and Holocene in the south of Western Siberia: geochemical indices and pollen data in Kyrtyma Lake sediments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 438. DOI [10.1088/1755-1315/438/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/438/1/012023)

Yuzhanina E.D., Ivanov S.N., Afonin A.S. et al. 2022. Mid to late Holocene paleoenvironmental changes in the southern forest border of Western Siberia inferred from pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 588: 110800. DOI: [10.1016/j.palaeo.2021.110800](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2021.110800)

Prospects for studying the paleo archive of lake sediment from the Sarskoe Bog



Zakharov A.L.^{1*}, Garankina E.V.², Konstantinov E.A.¹, Rudinskaya A.I.¹, Shorkunov I.G.¹, Yurchenko A.P.¹, Shukhvostov R.S.^{1,2}

¹Institute of Geography RAS, Staromonetny Lane 29/4, Moscow, 119017, Russia;

²Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

ABSTRACT. In the center of the East European Plain, lake sediments provide the most detailed and high-resolution paleoarchives of the Late Pleistocene and Holocene periods. However, not all lake sediments can be used to reliably reconstruct regional paleoclimate and landscape changes. Factors such as the shape of the lake basin, the type of rocks beneath it, the number and flow of tributaries, and the vegetation present all play a role in determining the rate and composition of sedimentation in lake deposits, creating a unique record of the local environmental conditions. The Sarskoe Bog Basin has promising potential for providing a high-resolution record of the Late Pleistocene period. The core sample collected from the central part of the swamp met all expectations, but during the geophysical study of the geological structure and search for the maximum depth of lake sediments, it was found that the reference well was not in the most appropriate location. The first geophysical surveys conducted in the bog have improved our understanding of the paleorelief of the basin and will allow us to choose a location for the main well that is suitable for our research objectives.

Keywords: radiocarbon dating, geophysical studies, lake sediments, Neopleistocene

For citation: Zakharov A.L., Garankina E.V., Konstantinov E.A., Rudinskaya A.I., Shorkunov I.G., Yurchenko A.P., Shukhvostov R.S. Prospects for studying the paleo archive of lake sediment from the Sarskoe Bog // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 733-736. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-733

1. Introduction

The Sarskoye Bog, which is about 1.8 kilometers by 2.5 kilometers, is located in a deep basin of 35 to 40 meters within the Borisoglebsk Upland. The relief of this area was largely shaped by the glaciation that occurred during the Moscow period. The main tributary to Lake Nero, the Sara River, originates from the southern part of the bog.

The surface of the sphagnum swamp is slightly convex and covered with sparse pine trees that gradually disappear towards the edges. In the central part of the swamp, there is a reference well called GAT-6A. The previously obtained core, which was 19.35 meters long, was extracted using Livingston's manual lake piston drill. The samples were then studied using a variety of analytical methods in the paleoarchive laboratory at the Institute of Geography (IG RAS). These methods included lithological analysis, magnetic susceptibility measurement, and analysis of diatom species composition for a portion of the core. Dates from 14C AMS

(accelerator mass spectrometry) were obtained for plant macrofossils and total carbon content of organic compounds in the lake loam and gittia layers. Geophysical surveys were also conducted to obtain data on maximum sediment thicknesses, which led to the exclusion of further drilling at GAT-6A site and the search for a new core extraction site.

2. Materials and methods

In order to study the geological structure of the Sarsky swamp basin, an electrotomographic survey was conducted using 48-channel electrical exploration equipment, "SKALA 48K12", manufactured by KB Electrometry LLC in Novosibirsk. Four types of installations were used: three-electrode, symmetrical Wenner, Schlumberger, and dipole-axial, in order to achieve maximum depth resolution. The induced polarization method was employed to identify any residual anomalies associated with secondary electrical currents. A

*Corresponding author.

E-mail address: zaanleo@gmail.com (A.L. Zakharov)

Received: June 14, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



step size of 5 meters between electrodes provided the maximum reliable depth for the study, up to 70 meters. The data collected was processed using two-dimensional least squares inversion with a smoothing operator to enhance resolution and minimize contrast. As a result, two radial profiles were created, covering the lower portions of the northern and eastern slopes, intersecting at the location of GAT6a's reference well in the center of the basin. The submeridian profile measured 1,075 meters in length, while the sublatitudinal profile measured 955 meters.

3. Results and discussion

The conducted electrotomographic study revealed several electrophysical facies. Facies 1: A surface layer with a constant thickness of 5-9 meters and a high average electrical resistivity (ER) of 100-250 ohm-meters, up to 400-500 ohm-meters. The high parameter of the ER is due to the low mineralization of the water in the near-surface decompressed peat. The facies thickness correlates well with the water-peat layers uncovered in the exploration wells GAT1-5, 7, and reference well GAT-6A.

At the edge of the modern swamp, facies 1 transitions into second high-resistance facies 2, with similar average ER values of 100-200 ohm-meters and up to 300-ohm meters on the eastern side, and 100-300 ohm-meter and up to 550-ohm meter on the northern side. Preliminary data suggest that high ER values in facies 2 may be associated with the sand composition and low moisture content of glacial and glacio-fluvial deposits forming the basin sides. The near-surface thin and low-resistance facies 3, with a thickness of no more than 4 meters and ER values between 40 and 60 Ohm-meters, is confined exclusively to the lower parts of the slopes above the edge of the modern swamp, and is associated with the layer of the loamy sedimentary deposits.

The second and main low-resistance facies, 4, (with values ranging from 10 to 20 Ohm-meter, and up to 30 Ohm-meter) performs the topography of the basin floor, and is represented by a solid layer with an average thickness of 15 to 20 meters, with separate depression in the northern and eastern parts of the swamp (up to 35 to 40 meters and 40 to 45 meters, respectively).

Based on the analysis of core material from the GAT-6A reference well, the main low resistance facies 4 is associated with a thick layer of horizontally stratified lake sediments, consisting of loams and gittia with high mineral content, which account for their good electrical conductivity. The high-amplitude (15-35 m) wavy bottom of the lake sediments (facies 4) is preliminary associated with the primary glacial topography, which

has caused the complex shape of the basin. The lower facies 5, which forms the bottom of the basin, has a resistivity range from 40 to 120 Ohm-meters, which corresponds to indicators of deep-lying glacial deposits, measured earlier on the Borisoglebskaya Upland (Valdai Periglacial Guidebook, 2023).

4. Conclusions

The geomorphological characteristics of the Sarsky Bog basin, including its small size (7.5-7.7 square kilometers) and the limited catchment area, contributed to the directional and cyclic sedimentation process. This process was limited only by the slope, Aeolian (wind-blown) and organogenic (from living organisms) sources of sedimentary material.

Layered variations in the carbon content of organic compounds, carbonates and sandy mineral fractions reveal the local conditions that influenced the activation and attenuation of slope erosion, Aeolian sediment intake, and bioproductivity dynamics in the Late Pleistocene period during the late Valdai time. Thanks to the geophysical surveys and radiocarbon dating conducted, it has been determined that the location of GAT-6A reference well does not correspond to the areas with the highest sedimentation thickness in the basin. This will allow us to choose the best location for extracting cores with a paleo-archive for the Late Pleistocene period, not just for the Last Glacial Maximum and the Late Glacial.

The maximum sedimentation rates detected reach 60 meters and are focused in the central parts of the profiles. This is consistent with the periphery of the swamp rather than the center, where the glacial deposits lie at a depth of only 30 meters.

Acknowledgements

The work was funded by the RSCF (Russian Science Foundation) project No. 23-77-10063, entitled "Reconstruction of natural events based on high-resolution sedimentation paleoarchives from the center of the East European plain over the past 25 thousand years."

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook, 27–30 August. 2023. In: Garankina E., Konstantinov E., Lobkov V., Makeev A., Panin A., Shorkunov I. (Eds.), Moscow: IG RAS.

Перспективы изучения палеоархива озерных отложений Сарского болота

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЗахаров А.Л.^{1*}, Гаранкина Е.В.², Константинов Е.А.¹, Рудинская А.И.¹, Шоркунов И.Г.¹, Юрченко А.П.¹, Шухвостов Р.С.^{1,2}¹ Институт Географии РАН, Старомонетный переулок 29с4, Москва, 119017, Россия;² МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, Москва, 119991, Россия

АННОТАЦИЯ. В центре Восточно-Европейской равнины наиболее подробными седиментационными палеоархивами позднего плейстоцена и голоцена с высоким временным разрешением являются озерно-болотные отложения. Однако далеко не все колонки озерных осадков могут служить основой для надежных региональных палеоклиматических и палеоландшафтных реконструкций. Комбинация локальных факторов осадконакопления, таких как морфология озерной депрессии (площадь, форма и процессы, протекавшие на водосборном бассейне) состав и свойства подстилающих пород, число притоков и их водность, тип растительности – являются неотъемлемыми переменными в изменчивости состава и темпов осадконакопления озерных отложений и в формировании уникальной записи локальных условий конкретной котловины. Котловина Сарского болота является перспективной для получения палеоархива позднего неоплейстоцена высокого разрешения. Полученный ранее керн из центральной части котловины был изучен и соответствовал всем ожиданиям. Однако при геофизических исследованиях геологического строения осадков котловины и поиске максимальных мощностей озерных отложений, выяснилось, что опорная скважина заложена не в самом удачном месте. Первые геофизические профили, полученные на исследуемом болоте, уточнили наше представление о палеорельефе котловины и позволят выбрать место для бурения основной скважины соответствующее целям исследования.

Ключевые слова: радиоуглеродное датирование, электротомографические исследования, озерные отложения, неоплейстоцен

Для цитирования: Захаров А.Л., Гаранкина Е.В., Константинов Е.А., Рудинская А.И., Шоркунов И.Г., Юрченко А.П., Шухвостов Р.С. Перспективы изучения палеоархива озерных отложений Сарского болота // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 733-736. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-733

1. Введение

Сарское болото (1.8 км на 2.5 км) расположено в котловине глубиной 35–40 м в пределах Борисоглебской возвышенности, рельеф которой в значительной степени сформирован московским оледенением. В южной части болота берет начало река Сара – главный приток озера Неро. Поверхность сфагнового верхового болота слабовыпуклая, покрытая редкими соснами, исчезающими к периферии. В центральной части болота заложена опорная скважина GAT-6A.

Полученный ранее керн, длиной 19.35 м, поднят ручным озерным поршневым буром

Ливингстона. Пробы изучены набором аналитических методов в лаборатории палеоархивов природной среды ИГ РАН: серия литологических методов, магнитная восприимчивость, видовой состав диатомовых водорослей для части колонки. Получены даты ¹⁴C AMS в интервале 7–19.14 м по растительным макроостаткам мха и общему углероду органических соединений вмещающих слоев озерного суглинка и гиттии. Для получения данных о максимальных мощностях озерных отложений выполнены геофизические работы, результат которых исключил дальнейшее бурение скважины GAT-6A и привел к поиску нового места для извлечения керна.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: zaanleo@gmail.com (А.Л. Захаров)

Поступила: 14 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

В целях установления геологического строения бортов и днища котловины Сарского болота проведено электротомографическое исследование с помощью 48-канальной электроразведочной аппаратуры «СКАЛА 48K12» (ООО «КБ Электрометрии», г. Новосибирск). Были выбраны четыре установки: трёхэлектродная для достижения максимальной глубины зондирования, а также симметричная Веннера, Шлюмберже и дипольно-осевая для повышения разрешающей способности в верхней части разреза. Для выявления остаточных аномалий, связанных со вторичными электрическими токами, применялся метод вызванной поляризации. Шаг между электродами 5 м обеспечивал максимальную достоверную глубинность исследования до 70 м. Полученные данные были обработаны двумерной инверсией по методу наименьших квадратов с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности. В результате построены два радиальных профиля, охватывающие нижние части северного и восточного склонов и пересекающихся в районе опорной скважины GAT6a в центральной части котловины. Протяжённость субмеридианального профиля составила 1075, субширотного – 955 м.

3. Результаты и обсуждение

Проведённое электротомографическое исследование выявило ряд электрофизических фаций. Фация 1: поверхностный слой постоянной мощности 5–9 м с высокими средними показателями удельного электрического сопротивления (УЭС) – 100–250 Ом*м, до 400–500 Ом*м. Высокие показатели УЭС обусловлены крайне низкой минерализацией воды в приповерхностных разуплотнённых торфах, мощность фации хорошо коррелирует с мощностью водно-торфяной толщи, вскрытой в разведочных скважинах GAT1-5, 7 и опорной – GAT-6A. У края современного уреза болота приповерхностная фация 1 замещается (и подстилается) второй высокоомной фацией 2 с близкими средними показателями УЭС: 100–200 Ом*м, до 300 Ом*м на восточном борту и 100–300 Ом*м, до 550 Ом*м – на северном. Высокие показатели УЭС фации 2 предварительно связаны с песчаным составом и низкой влажностью ледниковых и водноледниковых отложений, формирующих борта котловины. Приповерхностная маломощная низкоомная фация 3 мощностью не более 4 м с показателями УЭС 40–60 Ом*м приурочена исключительно к нижним частям склонов выше уреза современного болота и связана с толщиной склоновых суглинистых отложений. Вторая и основная низкоомная фация 4 (10-20 Ом*м, до 30 Ом*м) выполняет неровности днища котловины и представлена сплошной линзой средней мощностью 15–20 м с отдельными переуглублениями в северной (до 35–40 м) и восточной части (до 40–45 м) современного болота. На основании анализа кернового материала опорной скважины GAT-6A основ-

ная низкоомная фация 4 связана с мощной толщей горизонтально-слоистых озёрных отложений: суглинков и гиттии с высокой минерализацией, обуславливающих их хорошую электропроводность. Высокоамплитудная (15-35 м) волнистая подошва озёрных осадков (фация 4) предварительно связана с первичной ледниковой топографией, обусловившей сложную форму котловины. Нижняя фация 5, формирующая днище котловины, имеет диапазон УЭС от 40 до 120 Ом*м, что соответствует показателям глубоко залегающих ледниковых отложений, измеренным ранее на Борисоглебской возвышенности (Valdai Periglacial Guidebook, 2023).

4. Заключение

Геоморфологическая автономность и малая площадь водосбора (7.5–7.7 км²) котловины Сарского болота способствовали направленному и циклическому седиментогенезу, ограниченному лишь склоновыми, эоловыми и органогенными *in situ* источниками осадочного материала. Послойные вариации показателей содержания углерода органических соединений, карбонатов, а также крупнопылеватой и песчаных фракций минеральной массы вскрывают локальные условия активизации и затухания склоновой эрозии в котловине, эолового поступления вещества и динамики биопродуктивности палеозера в позднем валдае.

Благодаря проведенным геофизическим исследованиям и полученным радиоуглеродным датировкам выяснилось, что расположение скважины GAT-6A не соответствует самым большим мощностям заполнения котловины, что позволит в будущем правильно выбрать место для извлечения керна с палеоархивом на весь поздний неоплейстоцен, а не только на максимум оледенения и позднеледниковье. Обнаруженные максимальные мощности достигают 60 метров и приурочены к центральным частям профилей, что соответствует скорее периферии болота, а не центру, где кровля ледниковых отложений залегает на глубине всего лишь 30 метров.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФ 23-77-10063 «Реконструкция природных событий по высокоразрешающим седиментационным палеоархивам центра Восточно-Европейской равнины за последние 25 тысяч лет».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Valdai Periglacial Field Symposium Guidebook, 27–30 August. 2023. In: Garankina E., Konstantinov E., Lobkov V., Makeev A., Panin A., Shorkunov I. (Eds.), Moscow: IG RAS.

Correlation of Lake Tyungyulyu Water Level with Larch Radial Growth in Central Yakutia



Zhang X.*

North-Eastern Federal University, Belinskogo Street, 58, Yakutsk, 677000, Russia

ABSTRACT. This study analyzes the monthly and seasonal correlation between the water level in Lake Tyungyulyu and the radial growth of larch across three sites in the Churapcha region of Central Yakutia. The highest Pearson correlation coefficients (r), reaching up to 0.44, have been identified between the water level and the width of the annual rings of larch (*Larix cajanderi* Mayr) at the third site during the summer-autumn period. These findings suggest the potential of larch in Central Yakutia as an indicator of ecological responses to hydrological conditions and climate changes.

Keywords: larch, annual ring width, water level, lake hydrology, Central Yakutia

For citation: Zhang X. Correlation of Lake Tyungyulyu Water Level with Larch Radial Growth in Central Yakutia // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 737-740. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-737

1. Introduction

The hydrological dynamics of lakes are closely linked to the state of the surrounding ecosystem. Changes in water levels of lakes play a crucial role in understanding the ecosystem's response to climate changes. The indicator of tree annual ring width is utilized in studies of environmental and climatic changes.

The objective of this work is to analyze the relationship between the water level of Lake Tyungyulyu and the radial growth of larch (*Larix cajanderi* Mayr) in Central Yakutia.

2. Materials and Methods

Water level monitoring was conducted at Lake Tyungyulyu (62.18° N, 130.72° E) using data from the Federal State Budgetary Institution "Yakutsk UGMS" for the period 1962-2020 (58 years). Three sites were selected for sampling the width of larch annual rings in the vicinity of the village of Churapcha (62.00° N, 132.50° E) in July 2023. Larch samples were dried in a natural environment, secured, and polished in laboratory conditions. The data on the width of annual rings were read using the LINTAB-6 system and verified for dating quality using the COFECHA program (Grissino-Mayer, 2001; Rinn, 2003). The trend component was removed from the series of larch annual ring width data using negative exponential smoothing and the standard deviation was calculated.

*Corresponding author.

E-mail address: z461306425@gmail.com (X. Zhang)

Received: June 09, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

3. Results

The analysis revealed that the highest correlation values between the water level of the lake and the width of larch annual rings were observed at Site 3 (STD3) (Figure 1).

The range of correlation coefficients (r) at Site 3 varied from 0.27 in January to 0.45 in December. At Site 1 (STD1), r ranged from 0.12 in January to 0.25 in December, while at Site 2 (STD2), it ranged from 0.14 to 0.26.

During the spring period, r values at all sites were relatively low. At STD3, the mean annual r was 0.31, which is higher than at STD1 ($r=0.14$) and STD2 ($r=0.14$). The r values significantly increased in summer and autumn, with STD3 showing $r=0.40$ in summer and $r=0.44$ in autumn, which are overall 14% and 12% higher, respectively, compared to STD1 and STD2. In the winter period, the r value at STD3 was 0.36 (STD1 $r=0.17$ and STD2 $r=0.18$). The increase in r during summer and autumn reflects a close connection between the lake water level and the radial growth of larch in Central Yakutia.

4. Conclusion

The analysis results indicate varying relationships between the water level of Lake Tyungyulyu and the width of larch annual rings at three sites in the vicinity of the village of Churapcha (Central Yakutia).

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



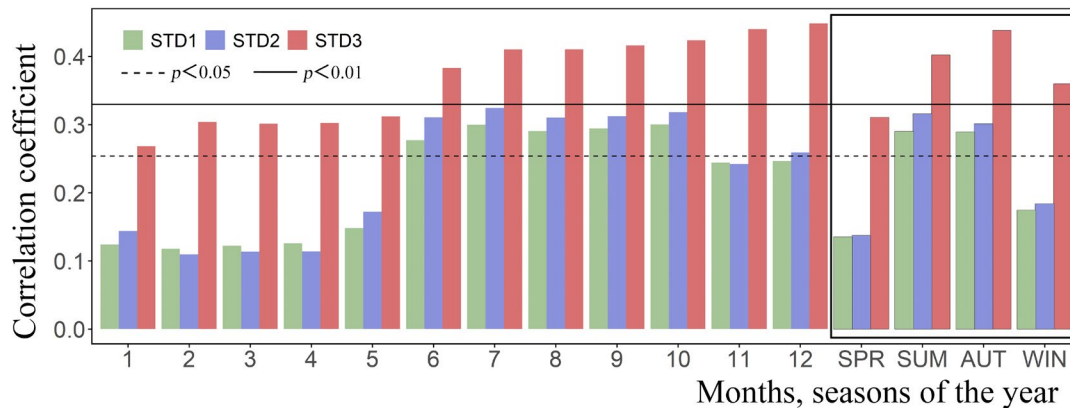


Fig.1. Pearson correlation coefficients between the water level of Lake Tyungyulyu and the width of annual rings at three sites (STD1, STD2, STD3) in the area of the village Churapcha, with SPR representing spring, SUM summer, AUT autumn, and WIN winter. The solid line indicates a probability of $p < 0.01$, and the dashed line indicates $p < 0.05$.

The highest correlation coefficients (r values above 0.4) were identified for STD3 during the summer-autumn period. We believe that the sensitivity of larch radial growth to seasonal changes in the water level of Lake Tyungyulyu is manifested in the studied area.

Further research is planned, incorporating abiotic factors of the non-living environment and other indicators (soil moisture, characteristics of lake bottom sediments, distance of the study sites from the lakes, altitude above sea level, etc.) to identify causal relationships. We consider that a comprehensive approach within this study can contribute to a thorough analysis of the relationship between lake hydrology and radial tree growth.

Acknowledgements

This study was carried out within the framework of the design part of a State Assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic FSRG-2023-0027 (project leader, Doctor of Geographical Sciences, Pestryakova L.A.). We thank the Federal State Budgetary Institution “Yakutsk

UGMS” for providing data on the monitoring of the water level in Lake Tyungyulyu. We are grateful to Candidate of Biological Sciences, Zakharev E.S., for assistance in collecting larch samples. We also thank Candidate of Geographical Sciences, M.S. Vasilyev, and A.I. Kolmogorov, a researcher at the laboratory for the study of the ecological state of the Arctic at Ammosov North-Eastern Federal University, for interpreting preliminary results.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Grissino-Mayer H.D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research*. 57(2):205-221.
- Rinn F. 2003. TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and 409 related applications. User reference, Heidelberg. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024876591616>

Связь уровня воды озера Тюнгюлю с радиальным ростом лиственницы в Центральной Якутии

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Чжан С.*

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, ул. Белинского, д. 58, г. Якутск, 677000, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе анализируется среднемесячная и сезонная корреляция между уровнем воды в оз. Тюнгюлю с радиальным ростом лиственницы на трех участках в районе с. Чурапча – Центральная Якутия. Наиболее высокие коэффициенты корреляции Пирсона (r) до 0,44 установлены между уровнем воды с шириной годичных колец лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr) на третьем участке в летне-осенний период. Полученные результаты могут указывать на потенциал лиственницы в Центральной Якутии как индикатора экологической реакции на гидрологические условия и климатические изменения.

Ключевые слова: лиственница, ширина годичных колец, уровень воды, гидрология озер, Центральная Якутия

Для цитирования: Чжан С. Связь уровня воды озера Тюнгюлю с радиальным ростом лиственницы в Центральной Якутии // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 737-740. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-737

1. Введение

Гидрологическая динамика озер тесно связана с состоянием окружающей экосистемы. Изменения уровня воды в озерах играют важную роль в понимании реакции экосистем на климатические изменения. Показатель ширины годичных колец деревьев используется в исследованиях изменения окружающей среды и климата.

Цель работы – анализ связи уровня воды оз. Тюнгюлю с радиальным ростом лиственницы (*Larix cajanderi* Mayr) в Центральной Якутии.

2. Материалы и методы

Мониторинг уровня воды проводился в оз. Тюнгюлю (62.18° с.ш., 130.72° в.д.) – данные ФГБУ «Якутское УГМС» за период 1962-2020 гг. (58 лет) Выбраны три участка для отбора проб ширины годичных колец лиственницы (июль 2023 г.) в районе с. Чурапча (62.00° с.ш., 132.50° в.д.). Образцы лиственницы высушены в естественной среде, закреплены и отшлифованы в лабораторных условиях. Данные ширины годичных колец считаны с помощью системы LINTAB-6 и проверены на качество датирования с использованием программы COFESHA (Grissino-Mayer, 2001; Rinn, 2003). Из

ряда данных ширины годичных колец лиственницы удалена трендовая составляющая методом отрицательного экспоненциального сглаживания и рассчитано стандартное отклонение.

3. Результаты

Результат анализа показал, что на участке 3 (STD3) наиболее высокие значения корреляции между уровнем воды озера с шириной годичных колец лиственницы (Рис.1).

Диапазон изменения r на третьем участке от 0,27 (январь) до 0,45 (декабрь). На участке 1 (STD1) r от 0,12 (январь) до 0,25 (декабрь), а на участке 2 (STD2) от 0,14 до 0,26.

В весенний период r на всех участках относительно низкие. На STD3 средний годовой $r=0,31$, что выше, чем на STD1 ($r=0,14$) и STD2 ($r=0,14$). Летом и осенью r значительно выше. На STD3 $r=0,40$ летом и $r=0,44$ осенью, что в целом на 14% и 12% соответственно выше, чем на STD1 и STD2. В зимний период на STD3 $r=0,36$ (STD1 $r=0,17$ и STD2 $r=0,18$). Увеличение r летом и осенью отражает тесную связь между уровнем воды в озере и радиальным ростом лиственницы в Центральной Якутии.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: z461306425@gmail.com (С. Чжан)

Поступила: 09 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024



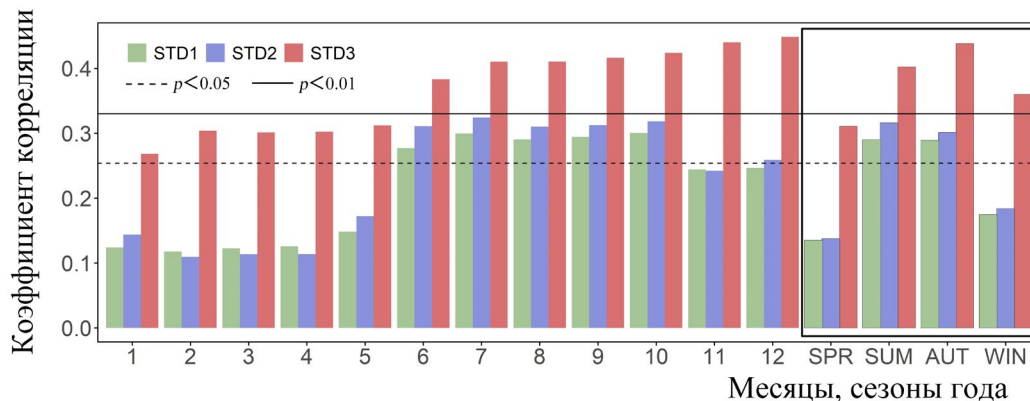


Рис.1. Коэффициенты корреляция *Пирсона* между уровнем воды в оз. Тюнгюлю с шириной годичных колец на трех участках (STD1, STD2, STD3) в районе с. Чурапча, SPR - весна, SUM - лето, AUT - осень, WIN - зима. Сплошная линия: вероятность $p < 0,01$. Пунктирная линия $p < 0,05$.

4. Заключение

Результаты анализа указывают на различную связь между уровнем воды в оз. Тюнгюлю с шириной годичных колец лиственницы на трех участках в районе с. Чурапча (Центральная Якутия). Наибольшие r (свыше 0,4) выявлены для STD3 в летне-осенний период. Считаем, что в исследуемом районе проявляется чувствительность радиального прироста лиственницы к сезонным изменениям уровня воды в оз. Тюнгюлю.

Планируется продолжить исследование с привлечением абиотических факторов неживой природы и иных показателей (влажность почвы, характеристики донных отложений озер, расстояние исследуемых участков до озер, высота над уровнем моря и т.п.) для выявления причинно-следственных связей. Считаем, что комплексный подход в рамках данного исследования может способствовать полному анализу связи между гидрологией озер с радиальным ростом деревьев.

Благодарности

Благодарим ФГБУ «Якутское УГМС» за предоставленные данные по мониторингу уровня

воды в оз. Тюнгюлю. За помощь в сборе образцов лиственницы к.б.н. Захарова Е.С. За интерпретацию предварительных результатов к.г.н. М.С. Васильева и научного сотрудника лаборатории по изучению экологического состояния Арктики СВФУ им. М.К. Аммосова – А.И. Колмогорова. Исследование выполнено в рамках государственного задания СВФУ № FSRG-2023-0027 (руководитель проекта д.г.н. Пестрякова Л.А.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Grissino-Mayer H.D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-ring research*. 57(2):205-221.
 Rinn F. 2003. TSAP-Win: Time series analysis and presentation for dendrochronology and 409 related applications. User reference, Heidelberg. URL: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024876591616>

Glaciolacustrine sedimentary pattern of the Eastern White Sea area during the MIS 2



Zaretskaya N.E.^{1,2*}, Vashkov A.A.^{2,3}, Baranov D.V.¹, Lugovoy N.N.¹

¹Institute of Geography, RAS, Staromonetny lane, 29 bld. 4, Moscow, 119017, Russia

²FSBI "VNIIOkeangeologia", Angliyskiy ave. 1, St. Petersburg, 190121, Russia

³Geological Institute, KSC RAS, Fersmana 4, Apatity, 184209, Murmansk region, Russia

ABSTRACT. New data on the distribution and age of glaciolacustrine deposits on the Zimny, Abramovsky, Lyamitsky and Tersky shores of the White Sea are presented. It was possible to trace the dynamics of the glaciation development in the studied area during the LGM, as well as to reconstruct the stages of transition of the White Sea basin from the glacier to the sea basin. The glaciolacustrine sediments of the Abramovsky shore characterise the stage of glaciation onset, while those of the Zimny shore - the initial stage of glacier degradation, when a series of small proglacial water bodies adjoined its marginal zone. The glaciolacustrine sediments studied on the Lyamitsky and Tersky shores were formed in large proglacial lakes that immediately preceded the penetration of the Barents Sea waters into the White Sea basin, as a result of which its gradual salinisation occurred and marine sedimentation began.

Keywords: glaciolacustrine sediments, White Sea, last glacial maximum, deglaciation, Late Glacial period

For citation: Zaretskaya N.E., Vashkov A.A., Baranov D.V., Lugovoy N.N. Glaciolacustrine sedimentary pattern of the Eastern White Sea area during the MIS 2 // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 741-746. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-741

1. Introduction

Glaciolacustrine deposits are widespread in the areas of cover glaciations. They are a marker of the position of the edge zone of glaciation in different phases of its degradation, and also reflect the conditions of sedimentation in the glacial zone and are palaeoarchives of information on the development of the natural environment during glaciations. The study of the Quaternary sediment complex on the Zimny, Abramovsky, Lyamitsky and Tersky shores of the White Sea allowed us to identify the areas of distribution of sediments of glaciolacustrine and glacial-marine basins and to obtain new data on the chronology of the development of the last glaciation and the White Sea basin during the last glaciocementation cycle.

2. Materials and methods

In 2021-23, lithostratigraphic studies of coastal sections were carried out in the study area, with sampling for micropalaeontological analyses and OSL dating. The altitudinal position of glaciolacustrine deposits was determined using GNSS survey. On the Tersky

coast, drilling was carried out at the mouth of the Varzuga River, where a thick thickness of glaciolacustrine sediments was uncovered and studied in well cores. Subsequently, OSL dating was carried out, and micropalaeontological samples are in progress.

3. Results and discussion

Glaciolacustrine sediments marking the maximum stage of the last Scandinavian glaciation have been described by us on the Zimny (from the side of the Gorlo Strait) and Abramovsky shores of the White Sea in a series of transects. The sediments are deposited in the upper part of the section, mainly above the moraine, but may be underlain by glacial sediments. The glaciolacustrine sediments are represented by interbedded sand, mostly fine-grained, less frequently medium-coarse-grained, sometimes with fine horizontal or lenticular layering or with ripple marks, with thickness from fractions of mm to 5 cm, and siltstone also with thickness from fractions of mm to the first cm. Dropstones, as well as microspikes of different orientation and inclination angles are often found in the layers. OSL dates for these sediments were obtained in the

*Corresponding author.

E-mail address: zaretsk@igras.ru (N.E. Zaretskaya)

Received: June 06, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



range from 22 to 17 thousand years (the age decreases towards the glaciation boundary near the Kuloi River mouth), which corresponds to the time immediately preceding the maximum of the last glacial cover in this region around 17 thousand years ago (Astakhov et al., 2016; Hughes et al., 2016). It is likely that the exposed sediments correspond to a water body at the edge of the glacier gradually moving eastwards, which can be indicated by the gradual rejuvenation of the dates from west to east.

Glaciolacustrine sediments, presumably corresponding to the phases of degradation of the last Scandinavian glaciation, have been described by us on the Zimniy coast of the White Sea. Thus, in the section near the village of Ruchiye, the upper part of the section above the Ostashkov moraine reveals brownish-grey sand with thin lenticular and horizontal layering, interlayered with sandy brown siltstone. Siltstone layers are not evenly distributed along the section. From a depth of 0.8 m from the roof, rare pebbles occur in the sediments. In the interval 3.0-3.4 m gravel and pebble fragments are found in reddish-brown siltstone. The total thickness of this stratum is 3.35 m. In the section 3.5 km to the south-west, the thickness of these sediments does not exceed 1 m.

Judging by the small thickness of the identified glaciolacustrine sediments and their not ubiquitous distribution in the sections, a system of small glacial water bodies and connecting meltwater runoff valleys existed briefly on the Zimniy coast of the White Sea during the phases of glacial cover reduction. Such water bodies are known in the south-eastern part of the Kola region. They are usually small in size and associated with glacial water deltas. Sediments of such reservoirs are sometimes composed of banded clays and siltstones, and the time of existence could reach 600 years (Bakhmutov et al., 1993; Yevzerov, 2013). With further degradation of the last glaciation and melting of dead ice massifs, small water bodies gradually moved following the glacier margin zone. Gradually, a large glacial basin was formed in the White Sea basin, the sediments of which were examined on the Lyamitsky shore and in boreholes on the Tersky shore at the mouth of the Varzuga River. During the Allerød warming, the connection of this glacial basin with the world ocean occurred and the gradual salinisation of this water body began (Kolka et al., 2013; Yevzerov, 2013).

We studied glaciolacustrine sediments of the Late Pleistocene to Holocene transition on the Lyamitsky and Tersky coasts. On the Lyamitsky coast, these sediments are exposed on the day surface: here, in the lower part of the section, thinly layered fine-grained sand with a thickness of about 5 m is overlain by a thickness of banded clays and siltstones with a thickness of up to 2.5 m, with deformations of loading. Above the section, fine-grained sands and siltstones are interbedded. These sediments characterise the conditions of sedimentation in an extensive glacial reservoir in Onega Bay, the depth of which gradually decreased. Apparently, this reservoir gradually moved as the last glacial cover, which 'propped it up' from the west, degraded. Earlier spore-dust data obtained here show

that the basin was formed in the Older Dryas-Allerød phase (Vostrukhina, 1962). Thus, the beginning of sediment formation in this section would roughly coincide with the Neva (Syamozero) phase of the last ice sheet contraction, and subsequent sedimentation occurred in the Allerød (Astakhov et al., 2016; Korsakova et al., 2023).

At the mouth of the Varzuga River, a drilling profile of 11 boreholes at a depth of up to 20 m below the sea level revealed a thickness of banded clays up to 10 m thick, above the section passing into a thin interlayer of fine-grained sand and siltstone. This stratum is overlain by dark grey marine sands with shells, for which 14C dates of 9 cal. kyr BP were obtained (Zaretskaya et al., 2023). We assume that the proglacial basin at the mouth of the Varzuga River was formed synchronously with the basin in the Onega Bay during the Late Glacial. Apparently, such basins developed along the entire coast of the White Sea during the degradation of the last glaciation.

4. Conclusions

Thus, the study of glaciolacustrine deposits in the region allows us to trace the dynamics of the glacier cover development during the last maximum, and also shows the gradual transition of the White Sea basin from the glaciation stage to the marine basin. The glaciolacustrine sediments of the Abramovsky coast characterise the stage of glaciation onset, while those of the Zimniy coast - the initial stage of glacier degradation, when a series of small glacial water bodies adjoined its marginal zone. The glaciolacustrine sediments studied on the Lyamitsky and Tersky coasts were formed in large proglacial lakes that immediately preceded the penetration of the Barents Sea waters into the White Sea basin, which resulted in its gradual salinisation and marine sedimentation.

Funding

The research was financially supported by RSF, grant No. 22-17-00081.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest requiring disclosure in this article.

References

- Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4–14.
- Bakhmutov V.G., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. 1993. Paleomagnetism and lithology of Late Weichselian deposits in Ust-Pjalka's periglacial lake, south-east of the Kola Peninsula. *Geologica Carpatica* 44 (5): 315–324.
- Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S. et al. 2016. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED–1. *Boreas* 45 (1): 1–45.
- Kolka V.V., Yevzerov V.Ya., Møller J.J. et al. 2013. The Late Weichselian and Holocene relative sea-level change and

isolation basin stratigraphy at the Uмба settlement, southern coast of Kola Peninsula. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya* 1:73-88. (In Russian)

Korsakova O., Vashkov A., Nosova O. 2023. European Russia: glacial landforms from the Bølling-Allerød Interstadial. In: *European Glacial Landscapes. The Last Deglaciation*. Palacios D., Hughes P.D., Garcia-Ruiz J.M., Andres N. (eds.). Elsevier, pp. 305–310.

Vostrukhina T.M. 1962. To the question of dating of lake-glacial deposits of the Onega Peninsula. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR* 145 (1): 151-153. (In Russian)

Yevzerov V.Ya. 2013. Minerageny of the loose cover of the northeastern part of the Baltic Shield. Apatity: KSC RAS. (In Russian)

Zaretskaya N.E., Baranov D.V., Pissova M.A. et al. 2023. Geology at the service of palaeogeography: reconstruction of the transition from the late Pleistocene to Holocene on the southern shore of the Kola Peninsula. Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. Issue 10, pp. 93-99. doi: [10.24412/2687-1092-2023-10-93-99](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-93-99) (In Russian)

Озёрно-ледниковые обстановки осадконакопления во время МИС 2 в Восточном Беломорье

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЗарецкая Н.Е.^{1,2*}, Вашков А.А.^{2,3}, Баранов Д.В.¹, Луговой Н.Н.¹¹Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, с.4, Москва, 119017, Россия²ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Английский пр-т, 1, Санкт-Петербург, 190121, Россия³Геологический институт КНЦ РАН, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209, Мурманская область, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены новые данные о распространении и возрасте озёрно-ледниковых отложений на Зимнем, Абрамовском, Лямецком и Терском берегах Белого моря. Удалось проследить динамику развития ледникового покрова в изученном районе во время последнего максимума, а также реконструировать стадии перехода котловины Белого моря от ледоёма к морскому бассейну. Озёрно-ледниковые осадки Абрамовского берега характеризуют стадию наступления оледенения, Зимнего берега - начальный этап деградации ледника, когда к его краевой зоне примыкала серия небольших приледниковых водоёмов. Озёрно-ледниковые отложения, изученные на Лямецком и Терском берегах, сформировались в крупных приледниковых водоёмах, которые непосредственно предшествовали проникновению вод Баренцева моря в котловину Белого, вследствие чего произошло его постепенное осолонение и началась морская седиментация.

Ключевые слова: озёрно-ледниковые отложения, Белое море, максимум последнего оледенения, дегляциация, позднеледниковье

Для цитирования: Зарецкая Н.Е., Вашков А.А., Баранов Д.В., Луговой Н.Н. Озёрно-ледниковые обстановки осадконакопления во время МИС 2 в Восточном Беломорье // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 741-746. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-741

1. Введение

В областях покровных оледенений широко распространены озёрно-ледниковые отложения. Они являются маркером положения краевой зоны оледенения в разные фазы его деградации, а также отражают условия осадконакопления в приледниковой зоне и являются палеоархивами информации о развитии природной среды во время оледенений. Исследование комплекса четвертичных отложений на Зимнем, Абрамовском, Лямецком и Терском берегах Белого моря позволило выявить участки распространения осадков озёрно-ледниковых и приледниково-морских бассейнов позволил получить новые данные о хронологии развития последнего оледенения и котловины Белого моря во время последнего гляциоседиментационного цикла.

2. Материалы и методы

В районе работ в 2021–23 годах были проведены литостратиграфические исследования бере-

говых разрезов, с отбором образцов на микропалеонтологические анализы и ОСЛ датирование. Высотное положение озёрно-ледниковых отложений определялось с помощью ГНСС-съёмки. На Терском берегу было проведено бурение в устьевой части р. Варзуги, где была вскрыта мощная толща озёрно-ледниковых отложений, изученных в кернах скважин. Впоследствии было проведено ОСЛ датирование, микропалеонтологические образцы находятся в работе.

3. Результаты и обсуждение

Озёрно-ледниковые отложения, маркирующие максимальную стадию последнего Скандинавского оледенения, описаны нами на Зимнем (со стороны пролива Горло) и Абрамовском берегах Белого моря в серии разрезов. Осадки залегают в верхней части разреза, в основном над мореной, но могут и подстилать ледниковые отложения. Озёрно-ледниковые отложения представлены переслаиванием песка, в основном мелкозернистого, реже

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: zaretsk@igras.ru (Н.Е. Зарецкая)

Поступила: 06 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



– средне-крупнозернистого, иногда – с тонкой горизонтальной или линзовидной слоистостью или со знаками ряби, мощностью от долей мм до 5 см, и алевролита также мощностью от долей мм до первых см. В слоях часто встречаются дробстоуны, а также микросбросы и микровзбросы разной ориентировки и углов наклона. Для этих отложений получены ОСЛ-даты в диапазоне от 22 до 17 тысяч лет (возраст уменьшается к границе оледенения в районе устья р. Кулой), что соответствует времени, непосредственно предшествующем максимуму последнего ледникового покрова в этом регионе около 17 тыс. л.н. (Astakhov et al., 2016; Hughes et al., 2016). Вероятно, вскрытые отложения соответствуют водоёму у края постепенно продвигающегося к востоку ледника, о чем может указывать постепенное омоложение дат с запада на восток.

Озёрно-ледниковые отложения, предположительно соответствующие фазам сокращения последнего Скандинавского оледенения, описаны нами на Зимнем берегу Белого моря. Так, в разрезе вблизи д. Ручьи в верхней части разреза над осташковской мореной вскрыт песок т.з. коричневатого-серый с тонкой линзовидной и горизонтальной слоистостью, переслаивающийся с опесчаненным алевролитом коричневого цвета. Прослой алевролита распределены по разрезу не равномерно. С глубины 0,8 м от кровли в осадках встречаются редкие гальки. В интервале 3,0–3,4 м обломки гравия и гальки отмечаются в красновато-коричневом алевролите. Общая мощность этой толщи 3,35 м. В разрезе в 3,5 км юго-западнее мощность этих отложений не превышает 1 м.

Судя по небольшой мощности выявленных озерно-ледниковых осадков и не повсеместному их распространению в разрезах, на Зимнем берегу Белого моря во время фаз сокращения ледникового покрова непродолжительное время существовала система небольших приледниковых водоёмов и соединяющих их долин стока талых вод. Такие водоёмы известны в юго-восточной части Кольского региона. Обычно они имеют небольшие размеры и ассоциированы с водно-ледниковыми дельтами. Осадки таких водоёмов иногда сложены ленточными глинами и алевролитами, а время существования могло достигать 600 лет (Bakmutov et al., 1993; Евзеров, 2013). При дальнейшей деградации последнего оледенения и вытаивании массивов мертвого льда небольшие водоёмы постепенно перемещались вслед за краевой зоной ледника. Постепенно в котловине Белого моря формировался крупный приледниковый бассейн, осадки которого были обследованы на Лямецком берегу и в скважинах на Терском берегу в устье р. Варзуга. Во время потепления аллерёд произошло соединение этого приледникового бассейна с мировым океаном и началось постепенное осолоноение этого водоёма (Колька и др., 2013; Евзеров, 2013).

Озёрно-ледниковые осадки, относящиеся к переходу от позднего неоплейстоцена к голоцену, были изучены нами на Лямецком и Терском берегах. На Лямецком берегу эти отложения вскрыва-

ются на дневной поверхности: здесь в нижней части разреза залегает тонкослоистый тонкозернистый песок мощностью около 5 м, который перекрыт толщей ленточных глин и алевролитов мощностью до 2,5 м, с деформациями пригрузки. Выше по разрезу переслаиваются тонкозернистые пески и алевролиты. Данные отложения характеризуют условия осадко-накопления в обширном приледниковом водоёме в Онежском заливе, глубина которого постепенно уменьшалась. По-видимому, этот водоём постепенно перемещался по мере деградации последнего ледникового покрова, «подпиравшего» его с запада. Ранее полученные здесь спорово-пыльцевые данные показывают, что бассейн формировался в фазу среднего дриаса – аллерёда (Вострухина, 1962). Таким образом, начало формирования осадков в этом разрезе будет примерно совпадать с невиской (сямозерской) фазой сокращения последнего ледникового покрова, а последующая седиментация происходила в аллерёде (Astakhov et al., 2016; Korsakova et al., 2023).

В устье р. Варзуга буровым профилем из 11 скважин на глубину до 20 м ниже у.м. была вскрыта толща ленточных глин мощностью до 10 м, выше по разрезу переходящая в тонкое переслаивание тонкозернистого песка и алевролита. Эта толща с размывом перекрывается тёмно-серыми морскими песками с ракушей, по которой получены ^{14}C даты 9 кал. т.л.н. (Зарецкая и др., 2023). Мы предполагаем, что приледниковый бассейн в приустьевой части р. Варзуги сформировался синхронно бассейну в Онежском заливе, в позднеледниковое время. По-видимому, такие бассейны развивались по всем побережью Белого моря во время деградации последнего оледенения.

4. Выводы

Таким образом, исследование озерно-ледниковых отложений в регионе позволяет проследить динамику развития ледникового покрова во время последнего максимума, а также показывает постепенный переход котловины Белого моря от стадии оледенения к морскому бассейну. Озерно-ледниковые осадки Абрамовского берега характеризуют стадию наступления оледенения, Зимнего берега - начальный этап деградации ледника, когда к его краевой зоне примыкала серия небольших приледниковых водоёмов. Озерно-ледниковые отложения, изученные на Лямецком и Терском берегах, сформировались в крупных приледниковых водоёмах, которые непосредственно предшествовали проникновению вод Баренцева моря в котловину Белого, вследствие чего произошло его постепенное осолоноение и началась морская седиментация.

Финансирование

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 22-17-00081.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Список литературы

Вострухина Т.М. 1962. К вопросу о датировке озёрно-ледниковых отложений Онежского полуострова. Доклады Академии Наук СССР 145(1): 151-153.

Евзеров В.Я. 2013. Минерагения рыхлого покрова северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты: КНЦ РАН.

Зарецкая Н.Е., Баранов Д.В., Писцова М.А. и др. 2023. «Геология на службе палеогеографии»: реконструкция перехода от позднего неоплейстоцена к голоцену на южном берегу Кольского полуострова. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 10: 93-99. DOI: [10.24412/2687-1092-2023-10-93-99](https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-93-99)

Колька В.В., Евзеров В.Я., Мёллер Я.Й. и др. 2013. Перемещение уровня моря в позднем плейстоцене – голоцене и стратиграфия донных осадков изолированных озер на южном берегу Кольского полуострова, в районе поселка Умба. Известия Российской академии наук. Серия географическая 1: 73–88.

Astakhov V., Shkatova V., Zastrozhnov A. et al. 2016. Glaciomorphological Map of the Russian Federation. *Quaternary International* 420: 4–14.

Bakhmutov V.G., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. 1993. Paleomagnetism and lithology of Late Weichselian deposits in Ust-Pjalka's periglacial lake, south-east of the Kola Peninsula. *Geologica Carpathica*. 44(5): 315–324.

Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S. et al. 2016. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1. *Boreas* 45 (1): 1–45.

Korsakova O., Vashkov A., Nosova O. 2023. European Russia: glacial landforms from the Bølling-Allerød Interstadial. In: *European Glacial Landscapes. The Last Deglaciation*. Palacios D., Hughes P.D., Garcia-Ruiz J.M., Andres N. (eds.). Elsevier.

Okenone and other fossil photopigments from the bottom sediments of Lake Shira, as a proxy of recent changes in the hydrological regime of the lake



Zykov V.V.^{1*}, Rogozin D.Y.^{1,2}

¹Institute of Biophysics, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences (IBP SB RAS), Akademgorodok Str., 50/50, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University (SibFU), 79 Svobodny Ave, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk, 660041, Russia

ABSTRACT. Studying the pigment composition of bottom sediments of the meromictic Lake Shira allows us to learn about the past of the reservoir. Analysis of carotenoids of frozen cores of the upper layers of bottom sediments, and comparison with field observations shows the relationship between the hydrological regime of the lake and the content of okenone, a carotenoid of purple sulfur bacteria.

Keywords: okenone, purple sulfur bacteria, meromixis, stratification, paleoclimate reconstruction

For citation: Zykov V.V., Rogozin D.Y. Okenone and other fossil photopigments from the bottom sediments of Lake Shira, as a proxy of recent changes in the hydrological regime of the lake // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 747-752. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-747

1. Introduction

Lake Shira (N 54.30, E 90.11) located in the northern part of the Minusinsk Basin, on the territory of the republic Khakassia (Russian Federation). Due to the presence of hydrogen sulfide at the edge of the photic zone during the whole year, in the middle layers of the water column exists a community of anoxygenic phototrophic bacteria of the lake, represented by purple sulfur bacteria (PSB) (Rogozin et al., 2012). The concentration of okenone - carotenoid of PSB, in the water column and bottom sediments is a biomarker of the meromictic state of the lake (Zykov et al., 2012).

For a long time, the lake had a stable meromictic mixing regime, but in 2014-2015 complete mixing was recorded and although the lake restored its previous mixing pattern in 2017, the concentration of hydrogen sulfide decreased and the position in the water column deepened, which negatively affected the PSB community (Rogozin et al., 2022).

The use of a freeze-corer made possible to collect the upper layers of bottom sediments as undisturbed as possible, fixing them in situ. This gives the opportunity to compare them with recent field observations of the anoxygenic community of the lake.

2. Materials and methods

In this research were used cores of bottom sediment from Lake Shira, collected by the freeze-corer

manufactured at the Institute of Biophysics SB of RAS in 2016, 2017, 2018 and 2023. From the frozen bottom sediments, bars measuring approximately 3*3 cm were sawn off longitudinally, which were then cut transversely in samples of 1 cm wide. Unlike the other cores, the one collected in 2023 was dried before extraction using an AK 4-50 freeze dryer (Proflab). Photopigments extracted from the samples, were then analyzed and quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC) according to the method of Wright et al (Wright et al., 1991; Zykov et al., 2012).

3. Results and discussion

The Laboratory of Ecosystem Biophysics of the Institute of Biophysics SB RAS annually performs monitoring of the water column of Lake Shira. In recent years, due to changes in the lake, mainly the deepening of hydrogen sulfide-containing water layers, the PSB community has weakened (Rogozin et al., 2020). Thus, the concentration of bacteriochlorophyll A and okenone in water and sediment traps since 2018 has been recorded below the detection ability by the spectrophotometric method. Such changes should have affected the carotenoids of bottom sediments. Considering that the thickness of the topmost annual layer of the ice core is about 3-4 mm, and then narrows to 2 mm (for the upper part of the core), the difference between the 2023 core and the previous ones should be 2-4 cm.

*Corresponding author.

E-mail address: zykovvv@yandex.ru (V.V. Zykov)

Received: June 03, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



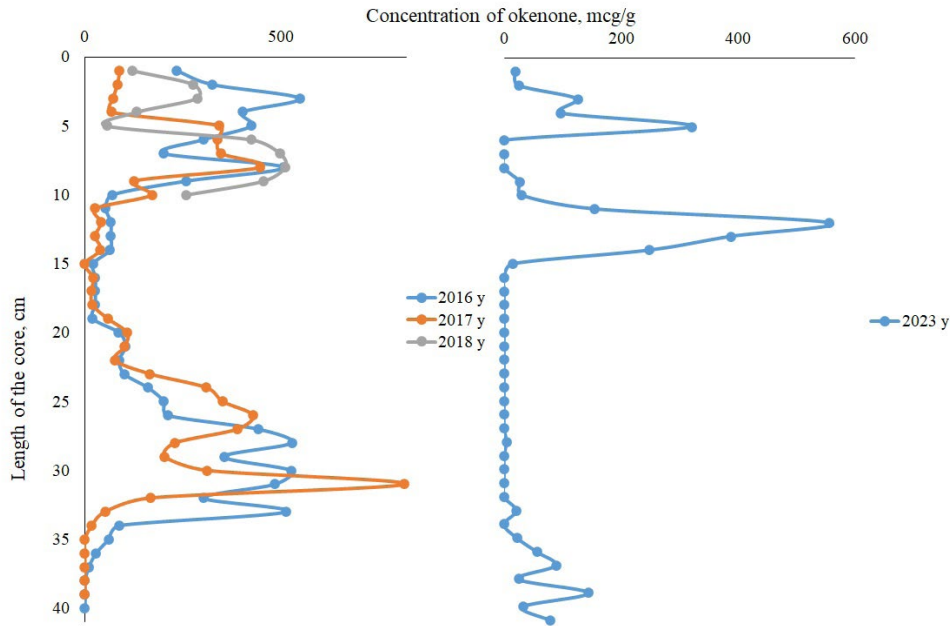


Fig.1. Distribution of okenone in ice cores of bottom sediments of Lake Shira calculated on the dry weight of the sample

Profiles of the vertical distribution of carotenoids extracted from bottom sediments were obtained. As can be seen in Figure 1, the increase in okenone content in the 3-8 cm section of the cores corresponds to 2003-2007, when the lake level increased due to an increase in water inflow. However, already in the upper layers of bottom sediments formed in 2014 and later, a decrease in okenone content. This is consistent with field observations; the above remains the same up to the spring of 2024.

The dynamics of the carotenoids of green algae and cyanobacteria - lutein and zeaxanthin (Fig. 2) in the upper part of the roll of 2023 also shows a sharp drop in the concentration of pigments. A similar pattern can be observed in areas of 15-20 and 35-40 cm. This can be caused by the deterioration of conservation conditions, since with the deepening of the oxygen

zone, the impact of destructive factors of carotenoids also increases.

Thus, a pattern has been shown between the lake stratification regime and changes in the composition of carotenoids in modern bottom sediments, which gives us valuable information for the paleoreconstruction of climate (precipitation amount) in the territory of Southern Siberia.

4. Conclusion

The dynamics of the content of okenone, as well as (to a lesser degree) lutein and zeaxanthin, shows that it responds to changes in levels of lake Shira. Thus, the influence of the lake's transition to a holomictic regime on the okenone content in bottom sediments is shown.

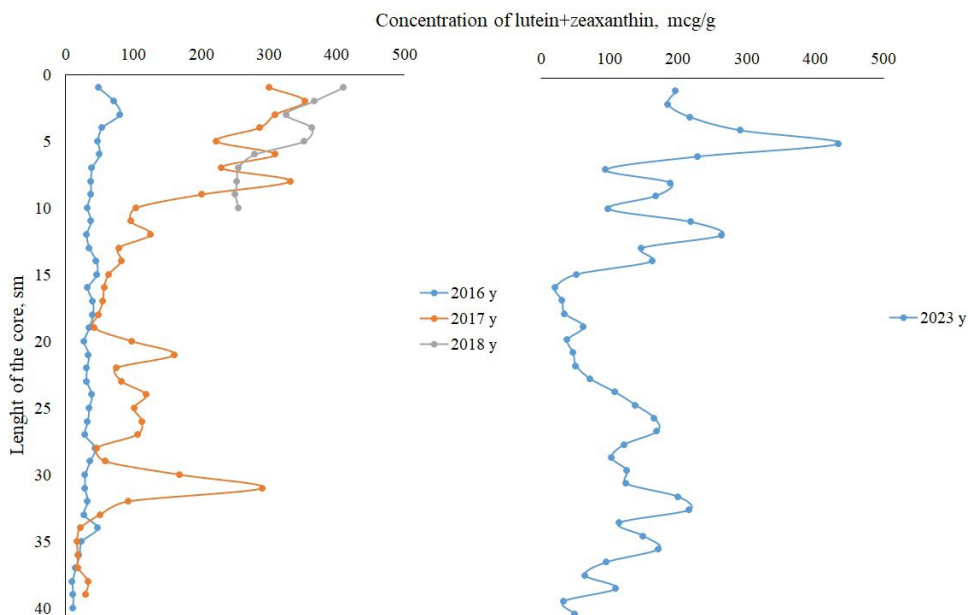


Fig.2. Distribution of the carotenoids lutein + zeaxanthin in ice cores from bottom sediments of Lake Shira calculated on the dry mass of the sample.

It can be assumed that the decrease in the okenone level reflects not only a decrease in the lake level, as was shown previously (Rogozin et al., 2017), but also its stabilization.

Acknowledgements

The research was funded by Russian Science Foundation, grant No. № 23-17-00067

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Rogozin D. Y., Zykov V. V., Degermendzhi A. G. 2012. Ecology of purple sulfur bacteria in the highly stratified meromictic lake Shunet (Siberia, Khakassia) in 2002-2009. *Microbiology* 81 (6): 727-735. DOI: [10.1134/S0026261712060148](https://doi.org/10.1134/S0026261712060148)

Rogozin D. Y., Tarnovsky M. O., Belolipetskii V.M. et al. 2017. Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible Reasons and Ecosystem respons. *Limnologica* 66: 12-23.

Rogozin D. Y., Zykov V. V., Bulkhin A. O. et al. 2020. Okenone in bottom sediments as a proxy for changes in the water level of a saline stratified lake. *Doklady Earth Sciences*. 493 (1): 98-102. DOI: [10.1134/S1028334X20070168](https://doi.org/10.1134/S1028334X20070168)

Rogozin D. Y., Darin A. V., Zykov V. V. et al. 2022. Seasonal sedimentation in saline Lake Shira (Siberia, Russia) and meromixis: implications for regional paleoclimate reconstructions. *Limnology and Freshwater Biology* 5 (4): 1547-1549. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1547](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1547)

Wright S. W., Jeffrey S. W., Mantoura R. F. et al. 1991. Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. Wright, S. W., Jeffrey S. W., Mantoura R. F., Llewellyn C. A., Bjornland T., Repeta D. *Marine Ecology Progress Series*, 183-196.

Zykov V. V., Rogozin D. Y., Degermendzhi A. G. et al. 2012. Carotenoids in bottom sediments of lake Shira as a paleoindicator for reconstruction of lake states in Khakassiya, Russia. *Contemporary Problems of Ecology* 5 (4): 434-442. DOI: [10.1134/S199542551204018X](https://doi.org/10.1134/S199542551204018X)

Окепон и прочие ископаемые фотопигменты в донных отложения озера Ши́ра, как индикатор недавних изменений в гидрологическом режиме водоема



Зыков В.В.^{1*}, Рогозин Д.Ю.^{1,2}

¹Институт биофизики, Сибирское отделение Российской Академии Наук (ИБФ СО РАН), ул. Академгородок, 50/50, Красноярский край, Красноярск, 660036, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, пр-т Свободный 79, Красноярск, 660041, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучение пигментного состава донных отложений меромиктического озера Ши́ра позволяет узнать данные о прошлом водоема. Анализ каротиноидов содержащихся в замороженных кернх верхних слоев донных отложений, и сопоставление с натурными наблюдениями показывает взаимосвязь между гидрологическим режимом озера и содержанием окепона - каротиноида пурпурных серных бактерий.

Ключевые слова: окепон, пурпурные серные бактерии, меромиксия, стратификация, реконструкция палеоклимата

Для цитирования: Зыков В.В., Рогозин Д.Ю. Окепон и прочие ископаемые фотопигменты в донных отложения озера Ши́ра, как индикатор недавних изменений в гидрологическом режиме водоема // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 747-752. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-747](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-747)

1. Введение

Озеро Ши́ра (N 54.30, E 90.11) – расположено в северной части Минусинской котловины, на территории р. Хакасия (Российская федерация). Из-за наличия сероводорода на краю фотической зоны в течение всего года в средних слоях водной толщи в озере существует сообщество анаэробных фототрофных бактерий, представленное пурпурными серными бактериями (ПСБ) (Rogozin et al., 2012). Концентрация в водной толще и донных отложениях каротиноида ПСБ – окепона является биомаркером меромиктического состояния водоема (Zykov et al., 2012).

На протяжении долгого времени озеро имело устойчивый меромиктический режим перемешивания, однако в 2014-2015 г было зафиксировано полное перемешивание и хотя озеро в 2017 г восстановило прежний режим, концентрация сероводорода понизилась, а положение в толще углубилось, что негативно отразилось на сообществе ПСБ (Rogozin et al., 2022).

Использование корера-намораживателя позволило отбирать верхние слои донных отложе-

ний максимально ненарушенными, фиксируя их *in situ*. Это позволяет сравнивать их с натурными наблюдениями анаэробного сообщества озера.

2. Материалы и методы

В данной работе использовались керны донных отложений из озера Ши́ра, отобранные с помощью корера-намораживателя, собранного в Институте биофизики СО РАН, в 2016, 2017, 2018 и 2023 гг. От замороженных донных отложений были продольно отпилены бруски размерами ок 3*3 см, которые затем были поперечно разрезаны с шагом 1 см. В отличие от остальных кренов, отобранный в 2023 г перед экстракцией был высушен с помощью лиофильной сушилки АК 4-50 (Профлаб). Из полученных образцов были экстрагированы фотопигменты которые затем были проанализированы и оценены количественно с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) по методике Wright et al (Wright et al., 1991; Zykov et al., 2012).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: zykovvv@yandex.ru (В.В. Зыков)

Поступила: 03 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



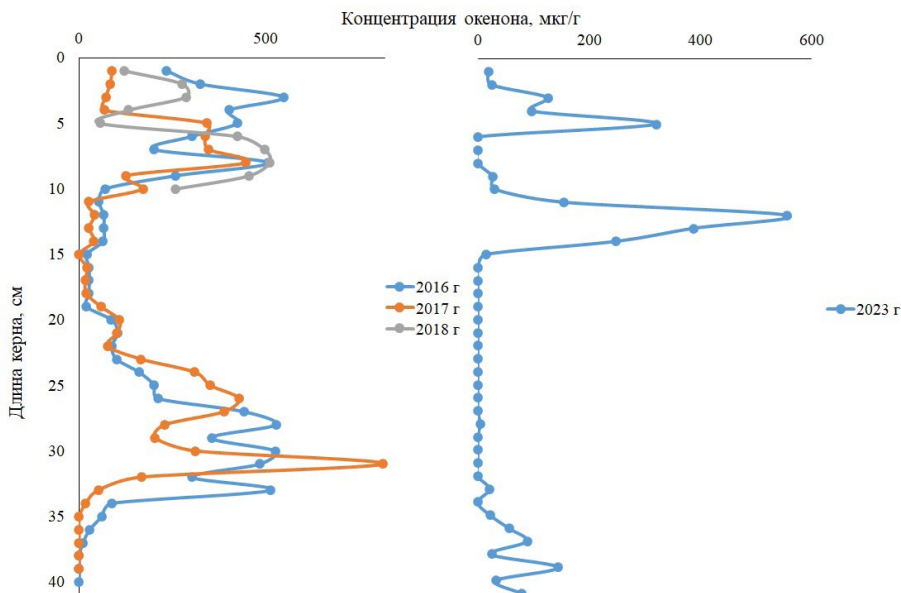


Рис.1. Распределение окенона в ледовых кернах донных отложений озера Ширы в расчете на сухой вес образца

3. Результаты и обсуждение

Лабораторией биофизики экосистем Института биофизики СО РАН ежегодно проводится мониторинг водной толщи озера Ширы. За последние годы, из-за изменений в толще озера, а именно углубления сероводородсодержащих слоев сообщество ПСБ ослабло (Rogozin et al., 2020). Так, концентрация бактериохлорофилла А и окенона в воде и седиментационных ловушках с 2018 г зафиксирована ниже порога обнаружения спектрофотометрическим методом. Такие изменения должны были отразиться на каротиноидах донных отложений. Учитывая, что толщина самого верхнего слоя ледяного керна ок. 3-4 мм, и затем сужается до 2 мм (для верхней части отложений), разница между керном 2023 г и предыдущими должна составлять 2-4 см.

В ходе работы были получены профили вертикального распределения каротиноидов, экстрагированных из донных отложений. Как видно на Рисунке 1, повышение содержания окенона на участке 3-8 см кернов соответствует 2003-2007 гг когда произошло повышение уровня озера за счёт увеличения притока воды. Однако уже верхних слоях донных отложений, сформировавшихся в 2014 и позже, начинается понижение содержания окенона. Это согласуется с натурными наблюдениями, вышеупомянутая сохраняется таким вплоть до весны 2024 г.

Динамика каротиноидов зеленых водорослей и цианобактерий - лютеина и зеаксантина (Рис. 2) в верхней части керна 2023 г тоже демонстрирует резкое падение концентрации пигментов. Аналогичный паттерн можно наблюдать и на участках 15-20 и 35-40 см. Возможно, это связано с ухудшением усло-

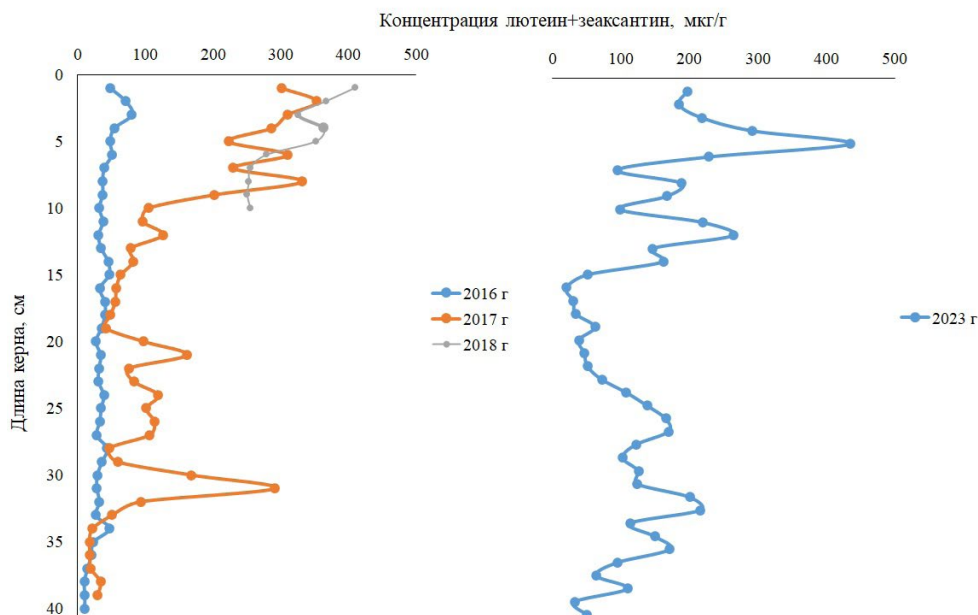


Рис.2. Распределение каротиноидов лютеина и зеаксантина в ледовых кернах донных отложений озера Ширы в расчёте на сухой вес пробы.

вии консервации, так как из-за углубления кислородной зоны, так же повышается воздействие разрушительных факторов каротиноиды.

Таким образом показана закономерность между режимом стратификации озера и изменением состава каротиноидов в новейших донных отложениях, что дает предоставляет нам ценную информацию для палеореконструкции климата (осадков) на территории Южной Сибири.

4. Заключение

Динамика содержания окенона, а также (в меньшей степени) лютеина и зеаксантина показывает, что она откликается на изменение уровня озера Ширы. Таким образом показано воздействие перехода озера в голомиктический режим при содержании окенона в донных отложениях. Можно предположить, что понижение уровня окенона отражают не только понижение уровня озера, как было показано раньше (Rogozin et al., 2017), но и его стабилизацию.

Финансирование

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ, грант № 23-17-00067.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- Rogozin D.Y., Zыkov V.V., Degermendzhi A.G. 2012. Ecology of purple sulfur bacteria in the highly stratified meromictic lake Shunet (Siberia, Khakassia) in 2002-2009. *Microbiology* 81 (6): 727-735. doi:[10.1134/S0026261712060148](https://doi.org/10.1134/S0026261712060148)
- Rogozin D. Y., Tarnovsky M. O., Belolipetskii V. M. et al. 2017. Disturbance of meromixis in saline Lake Shira (Siberia, Russia): Possible Reasons and Ecosystem respons. *Limnologica* 66: 12-23.
- Rogozin D.Y., Zыkov V.V., Bulkhin A.O. et al. 2020. Okenone in bottom sediments as a proxy for changes in the water level of a saline stratified lake. *Doklady Earth Sciences*. 493 (1): 98-102. doi:[10.1134/S1028334X20070168](https://doi.org/10.1134/S1028334X20070168)
- Rogozin D. Y., Darin A. V., Zыkov V. V. et al. 2022. Seasonal sedimentation in saline Lake Shira (Siberia, Russia) and meromixis: implications for regional paleoclimate reconstructions. *Limnology and Freshwater Biology* 5 (4): 1547-1549. doi:[10.31951/2658-3518-2022-A-4-1547](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1547)
- Wright S. W., Jeffrey S. W., Mantoura R. F. et al. 1991. Improved HPLC method for the analysis of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 183-196
- Zыkov V. V., Rogozin D. Y., Degermendzhi A. G. et al. 2012. Carotenoids in bottom sediments of lake Shira as a paleoindicator for reconstruction of lake states in Khakassiya, Russia. *Contemporary Problems of Ecology* 5 (4): 434-442. doi:[10.1134/S199542551204018X](https://doi.org/10.1134/S199542551204018X)

The age and size of the last glacial-underground lake of the Chui basin (Gorny Altai)



Zolnikov I.D.^{1*}, Novikov I.S.¹, Kurbanov R.N.², Filatov E.A.¹,
Glushkova N.V.¹, Levitskaya P.S.²

¹Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia

²Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetny Lane 29, Moscow 119017 Russia

ABSTRACT. Chronology and size of the last glacier-dammed lake in the Chuya Basin is still actively debated, because it is inextricably linked with the problem of the age and scale of the last glacial megaflood, which passed through the Chuya, Katun, and Ob valleys. For the first time, direct dating of lacustrine sediments of the last glacial-dammed lake of the Chuya Basin reaching up to 1980 m has been carried out. Obtained ages corresponds to the last glacial maximum (MIS-2) and confirms the glaciation of this age in the area within the valet connecting Chuya and Kurai basins.

Keywords: glacial-dammed lake, the last glaciation, Chuya basin, Gorny Altai

For citation: Zolnikov I.D., Novikov I.S., Kurbanov R.N., Filatov E.A., Glushkova N.V., Levitskaya P.S. The age and size of the last glacial-underground lake of the Chui basin (Gorny Altai) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 753-756. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-753

1. Introduction

Chronology and size of the last glacier-dammed lake in the Chuya Basin is still actively debated, because it is inextricably linked with the problem of the age and scale of the last glacial megaflood, which passed through the Chuya, Katun, and Ob valleys. The pioneers of the giant glacial mudflows in the Altai Mountains (Rudoy, 2005; Butvilovsky, 1993) considered the time of the last catastrophic megaflood to be the last glacial maximum (LGM). We systematically supported idea that there were no glacier-dammed lakes during LGM. This excluded the possibility of catafluvial breakthroughs from the Chuya-Kurai glacier-dammed limnosystem during LGM. Subsequently, new data were obtained that led to the recognition of the glacial dam existence, a formation of large glacier-dammed lake in the area adjacent to the Aktash village in the area where the Chuya valley is divided into “old” and “new” and its breakthrough dated around MIS-2 (Zolnikov et al., 2023). At the same time, the Maashey-Chibit glaciers could only dam the Kurai Basin, and the question of geological evidence of a glacial-dammed lake existence in the Chuya Basin remained open. Well-described lacustrine deposits between the Kuehtanar river valley and the Sukor landslide formed not due to the glacial damming, but due to the Sukor landslide,

which blocked the Chuya valley in the time range from 11 to 16 ka ago (established by 8 OSL ages) (Deev et al., 2022). It is obvious that the glacially-dammed lake in the Chuya Basin must have existed earlier. Three OSL ages from fluvio-glacial layers in the Kuehtanar moraines with an average value of 27 ka (Deev et al., 2022) did not clarify this issue. These ages seem to be overly ancient. To determine the age of the last glacially-dammed lake in the Chuya Basin, it was necessary to obtain geochronometric data on the corresponding lacustrine deposits. Predecessors noted sediments of the glacially-dammed basin on the northeastern edge of the Chuya Basin (Devyatkin, 1965).

2. Materials and methods

In 2022 we carried out field work on the north-eastern edge of the Chuya Basin, aimed at studying the Quaternary sediments forming the lacustrine terrace, which rises several meters above the floodplain of modern rivers Buraty, Ulandryk, Tashanta, Yustyd, Bar-Burgazy, Kunduyak, Sailyugem, Kyzylshyn. On the surface lacustrine terrace is complicated by bars, which are boulder-pebble shafts of asymmetrical cross-section, several km long. Absolute elevations of the location where the plain adjoins the mountain frame of the

*Corresponding author.

E-mail address: vse-snega@yandex.ru (I.D. Zolnikov)

Received: June 15, 2024; **Accepted:** July 08, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



basin is at the range of 1835-1982 m. Here in a series of pits coastal-lacustrine sandy deposits are exposed to a depth of 2-3 m.

3. Results and discussion

Layering in the sands ranges from parallel and gently wave-like to lenticular-mould-shaped; there are fine cross-beddings and signs of wind ripples, gravel and pebble layers. In a pit near the northern outskirts of the Kokorya village (N = 49.92008°; E = 89.00278°; elevation 1880 m), well-washed medium-coarse-grained sand, parallel layered with fragmentary small ripples of wind waves, were discovered to a depth of 2.2 m. Four samples were collected for OSL dating at intervals of 40 cm, from which ages with an average 22 ka was obtained with discrepancy of less than 2 ka.

4. Conclusions

Thus, for the first time, direct dating of lacustrine sediments of the last glacial-dammed lake of the Chuya Basin reaching up to 1980 m has been carried out. Obtained ages corresponds to the last glacial maximum (MIS-2) and confirms the glaciation of this age in the area within the valet connecting Chuya and Kurai basins.

Acknowledgements

The research study was supported by Russian Science Foundation, RSF project 22-17-00140.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest

References

- Butvilovsky V.V. 1993. Paleogeography of the last glaciation and Holocene of Altai: an event-catastrophic model. Tomsk: Publishing house Tom. Univ.
- Devyatkin E.V. 1965. Cenozoic sediments and neotectonics of South-Eastern Altai. Tr. GIN. 126: 243.
- Deev E.V., Zolnikov I.D., Kurbanov R.N. et al. 2022. Age of the Sukor seismogenic landslide according to OSL dating: significance for paleoseismology and paleogeography of the Altai Mountains. *Geology and Geophysics* 63(6): 898–912. [10.15372/GiG2021106](https://doi.org/10.15372/GiG2021106)
- Rudoy A.N. 2005. Giant current ripples (history of research, diagnostics, paleogeographical significance). Tomsk: TSPU Publishing House.
- Zolnikov I.D., Novikov I.S., Deev E.V. et al. 2023. The last glaciation and glacier-dammed lakes in the south-eastern part of the Altai Mountains. *Ice and Snow* 63(4): 171-184. [10.31857/S207667342304018X](https://doi.org/10.31857/S207667342304018X)

Возраст и размер последнего ледниково-подпрудного озера Чуйской котловины (Горный Алтай)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЗольников И.Д.^{1*}, Новиков И.С.¹, Курбанов Р.Н.², Филатов Е.А.¹,
Глушкова Н.В.¹, Левицкая П.С.¹¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Сибирское отделение Российской академии наук. Россия. 630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3²Институт географии Российской академии наук. Россия. 119017, Москва. Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4

АННОТАЦИЯ. Вопрос о времени существования и размерах последнего ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине до сих пор активно дискутируется, т.к. он неразрывно связан с проблемой возраста и масштабов последнего гляциального суперпаводка, проходившего по долинам Чуи, Катуня, Оби. Нами впервые произведено прямое датирование озерных отложений последнего ледниково-подпрудного бассейна Чуйской котловины высотой до 1980 м. Полученные даты соответствуют последнему ледниковому максимуму (МИС-2) и подтверждают оледенение этого возраста в районе перемычки между Чуйской и Курайской котловинами.

Ключевые слова: ледниково-подпрудное озеро, последнее оледенение, Чуйская котловина, Горный Алтай

Для цитирования: Зольников И.Д., Новиков И.С., Курбанов Р.Н., Филатов Е.А., Глушкова Н.В., Левицкая П.С. Возраст и размер последнего ледниково-подпрудного озера Чуйской котловины (Горный Алтай) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 753-756. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-753

1. Введение

Вопрос о времени существования и размерах последнего ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине до сих пор активно дискутируется, т.к. он неразрывно связан с проблемой возраста и масштабов последнего гляциального суперпаводка, проходившего по долинам Чуи, Катуня, Оби. Первооткрывателями гигантских гляциальных селей на Горном Алтае (Рудой, 2005; Бутвиловский, 1993) временем последнего проявления катастрофических потоков считался последний ледниковый максимум (ПЛМ). Нами, на продолжении длительного времени отстаивалось мнение о том, что в эпоху ПЛМ на территории Чуйской и Курайской котловин не существовало ледниково-подпрудных озёр. Это соответственно исключало возможность катафлювиальных прорывов из Чуйско-Курайской ледниково-подпрудной лимносистемы в ПЛМ. Впоследствии были получены новые данные, которые привели к признанию существования ледниковой плотины, ледниково-подпрудного озера и его прорыва возраста МИС-2 в районе, прилегающем к пос. Акташ на участке разделения долины Чуи на «старую» и «новую» (Зольников и др., 2023). Вместе

с тем, Маашейско-Чибитские ледники могли запруживать только Курайскую котловину, а вопрос об отложениях ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине оставался открытым. Хорошо известные достоверно озерные отложения между долиной р. Куэхтанар и Сукорским оползнем-обвалом оказались сформированными не за счет ледниковой дамбы, а за счет Сукорского оползня-обвала, перегораживавшего Чуйскую долину во временном диапазоне (установленном по 8 ОСЛ-датам) от 11 до 16 тыс.л.н. (Деев и др., 2022). Очевидно, что ледниково-подпрудное озеро в Чуйской котловине должно было существовать раньше. Три ОСЛ-даты из флювиогляциальных прослоев в оплывневых куэхтанарских моренах со средним значением 27 тыс.л.н. (Деев и др., 2022) не внесли ясность в данный вопрос. Эти даты представляются чрезмерно удревненными. Для выяснения возраста последнего ледниково-подпрудного озера в Чуйской котловине было необходимо получить геохронометрические данные по соответствующим отложениям. Предшественниками осадки ледниково-подпрудного бассейна отмечались на северо-восточной окраине Чуйской котловины (Девяткин, 1965).

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: vse-snega@yandex.ru (И.Д. Зольников)

Поступила: 15 июня 2024; Принята: 08 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



2. Материалы и методы

В 2022 году на северо-восточной окраине Чуйской котловины были проведены полевые работы, ориентированные на изучение четвертичных отложений, слагающих озерную равнину, которая возвышается на несколько метров над поймой современных рек Бураты, Уландрык, Ташанта, Юстыд, Бар-Бургазы, Кундуяк, Сайлюгем, Кызылшын. С поверхности озерная равнина осложнена баррами, которые представляют собой валуно-галечные валы ассиметричного поперечного сечения, длиной несколько километров. Там, где равнина примыкает к горному обрамлению котловины, на абсолютных отметках в диапазоне 1835-1982 м, серией шурфов были вскрыты прибрежно-озерные песчаные отложения на глубину до 2-3 м.

3. Результаты и обсуждение

Слоистость в песках от параллельной и полого волнообразной до линзовидно-мульдообразной; встречается мелкая косослойчатость и знаки ветровой ряби. Встречаются гравийно-древесные прослои, и галька. В шурфе у северной окраины деревни Кокоря (N = 49.92008°; E = 89.00278°; высота 1880 м.) на глубину 2,2 м был вскрыт хорошо промытый средне-крупнозернистый песок тонко-мелко субгоризонтально параллельно слоистый с фрагментарно встречающейся мелкой рябью ветрового волнения. Из песка были отобраны 4 образца на ОСЛ-анализ с интервалом через 40 см, по которым получены даты со средним значением возраста 22 тыс.л. в диапазоне расхождения менее 2 тыс.л.

4. Заключение

Таким образом, впервые произведено прямое датирование озерных отложений последнего ледниково-подпрудного бассейна Чуйской котло-

вины высотой до 1980 м. Полученные даты соответствуют последнему ледниковому максимуму (МИС-2) и подтверждают оледенение этого возраста в районе перемычки между Чуйской и Курайской котловинами.

Благодарности

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект РНФ 22-17-00140.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Бутвиловский В.В. 1993. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во Том. ун-та.
- Девяткин Е.В. 1965. Кайнозойские отложения и неотектоника Юго-Восточного Алтая. Тр. ГИН. 126: 243.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Курбанов Р.Н. и др. 2022. Возраст Сукорского сейсмогенного оползня по данным ОСЛ-датирования: значение для палеосейсмологии и палеогеографии Горного Алтая. Геология и геофизика 63 (6): 898–912. [10.15372/GiG2021106](https://doi.org/10.15372/GiG2021106)
- Зольников И.Д., Новиков И.С., Деев Е.В. и др. 2023. Последнее оледенение и ледниково-подпрудные озера в юго-восточной части Горного Алтая. Лед и Снег 63 (4): 171-184. [10.31857/S207667342304018X](https://doi.org/10.31857/S207667342304018X)
- Рудой А.Н. 2005. Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика, палеогеографическое значение). Томск: Изд-во ТПУ.

Pollen analysis in reconstruction of paleo vegetation on the southwestern part of the Yamal Peninsula

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Nigamatzyanova G.R.^{1,2*}, Nigmatullin N.M.¹, Frolova L.A.^{1,2}

¹Kazan Federal University (KFU), Kremlevskaya Str., 18, Kazan, 420008, Russia

²Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (IAET SB RAS), Acad. Lavrentiev Avenue, 17, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The aim of this study is to explore the pollen palynomorphs from the bottom sediments of an unnamed tundra lake whilst attempt to reconstruct the past vegetation and paleoecological conditions for the southwestern part of the Yamal Peninsula. 34 pollen (11 boreal, 18 arboreal) and 5 spore palynomorphs were identified. Pollen spectra characterized by a predominance of arboreal pollen (*Betula* sect. *Nanae*, *Betula* sect. *Albae*, *Alnus*). It was found in the range of ~6000-5100 cal. yr BP during the Holocene optimum birch forest and shrubby vegetation with bogs has been developed in the lake's catchment area. The tundra biome was dominant, however, around ~5800 cal. yr BP, the indicator of the taiga biome increases to maximal values. Since the beginning of the Subatlantic period (~2200 cal. yr BP), local vegetation began to evolve into the modern southern tundra with shrubs (dwarf birch, alder, willow), and sedge-sphagnum bogs in lowlands.

Keywords: Holocene, pollen and spore, biomes reconstruction, lake sediments, paleoecology, Subarctic tundra

For citation: Nigamatzyanova G.R., Nigmatullin N.M., Frolova L.A. Pollen analysis in reconstruction of paleo vegetation on the southwestern part of the Yamal Peninsula // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 757-760. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-757

Pollen analysis is a method that offers insights into vegetation changes, historical climate patterns, and sediment layers (Rudaya et al., 2021; Nigamatzyanova et al., 2022). This article reconstructs vegetation and environmental change on the southwestern part of the Yamal Peninsula over the past ~6000 cal. yr BP based on new studies of pollen sequences from unnamed tundra lake 21-Ya-02 in the basin of the Yerkuta River. The research area is located within the subzone of the southern subarctic tundra. Tundra-bog complexes are widely spread in the region (Yurtsev, 1978). A 67 cm core of bottom sediments was retrieved in 2021 from the central part of the water body at a depth of 4.3 m (coordinates of the sampling point 68°09.897' N, 68°57.602' E.). 25 samples underwent palynological analysis using the Faegri-Iversen method (Faegri and Iversen, 1989). The reconstruction of biomes was carried out according to the methods proposed by Prentice et al. (1996). 34 pollen (11 boreal, 18 arboreal) and 5 spore palynomorphs were identified. Pollen spectra characterized by a predominance of arboreal pollen (*Betula* sect. *Nanae*, *Betula* sect. *Albae*, *Alnus*). Cyperaceae pollen dominated among non-arboreal taxa. *Artemisia*, Poaceae, *Rubus chamaemorus* were characterized by the

constant presence of pollen throughout the core thickness. *Sphagnum* spores made up most of the fossil spore palynomorphs. These taxa characterized tundra landscapes. Radiocarbon dating of core sediment samples conducted at the National Taiwan University (NTUAMS Lab, Taipei, Taiwan) allowed us to estimate the total age at ~6000 cal. yr BP. According to the pollen data obtained, the dominance was reconstructed of tundra landscapes. The qualitative interpretation of the palynological diagram is supported by the quantitative dominant of tundra biome. The high pollen concentration in ~6000-5100 cal. yr BP may indicate relatively favorable climatic conditions during the Holocene optimum (Andreev and Klimanov, 2000; Andreev et al., 2001 etc.). In the pollen spectra, birch, willow, alder, and heather pollen dominate. Sedge-sphagnum bogs were widely spread. The tundra biome was dominant, however, around ~5800 cal. yr BP, the indicator of the taiga biome increases to maximal values. The vegetation around the lake began to acquire the modern appearance of the southern tundra, characterized by the widespread development of shrub tundra (dwarf birch, alder, willow), and lowland moss bogs around ~2200 cal. yr BP, which coincides with the beginning

*Corresponding author.

E-mail address: GuRNigamatzyanova@kpfu.ru (G. Nigamatzyanova)

Received: June 22, 2024; **Accepted:** August 19, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



of the Subatlantic period (Andreev et al., 2024). Biome reconstruction demonstrates the taiga score decrease and the tundra score increase to the maximum.

Acknowledgements

Palynological analysis was carried out within the framework of the Strategic Academic Leadership Program of Kazan Federal University (Priorities–2030).

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Andreev A.A., Klimanov V.A. 2000. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia. *Journal of Paleolimnology* 24: 81–91.

Andreev A.A., Manley W.F., Ingo'lfsson O'. et al. 2001. Environmental changes on Yugorski Peninsula, Kara Sea, Russia, during the last 12,800 radiocarbon years. *Global and Planetary Change*. 31: 255–264.

Andreev A.A., Tarasov P.E., Lenz M. et al. 2024. Environmental changes on the northern Taymyr Peninsula (Russian Arctic) during the last 62 ka inferred from the lacustrine pollen record. *Boreas*. DOI: [10.1111/bor.12657](https://doi.org/10.1111/bor.12657)

Faegri K., Iversen J. 1989. Textbook of pollen analysis. Chichester: Publisher John Wiley and Sons.

Nigamatzyanova G.R., Nigmatullin N.M., Valieva E.A. et al. 2022. The dynamics of vegetation and environmental conditions in the southern Yamal Peninsula during the Holocene inferred from the palynological analysis of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1512-1514. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1512](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1512)

Prentice I.C., Guiot J., Huntley B. et al. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*. 12: 185–194.

Rudaya N., Nazarova L., Frolova L. et al. 2021. The link between climate change and biodiversity of lacustrine inhabitants and terrestrial plant communities of the Uvs Nuur Basin (Mongolia) during the last three millennia. *The Holocene* 31 (9): 1–16. DOI: [10.1177/09596836211019093](https://doi.org/10.1177/09596836211019093)

Yurtsev B.A. 1978. The Arctic Floral region. Leningrad: Nauka. (in Russian)

Пыльцевой анализ в реконструкции палеораствительности юго-западной части полуострова Ямал

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНигаматзянова Г.Р.^{1,2*}, Нигматуллин Н.М.¹, Фролова Л.А.^{1,2}¹ Казанский федеральный университет (КФУ), Кремлевская ул., 18, Казань, 420008, Россия² Институт археологии и этнографии СО РАН (ИАЭТ СО РАН), пр. Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Целью данного исследования является изучение пыльцы растений в донных отложениях безымянного тундрового озера, реконструкция растительности и палеоэкологических условий юго-западной части полуострова Ямал. В общей сложности идентифицировано 34 пыльцевых (11 древесных, 18 травянистых) и 5 споровых палиноморф. Пыльцевые спектры характеризовались доминированием пыльцы *Betula sect. Nanae*, *Betula sect. Albae*, *Alnus*. В оптимум голоцена 6000-5100 кал. л.н. растительность вокруг озера была представлена березой, ивой, ольхой и вересковыми. На территории водосборного бассейна озера были широко распространены осоково-сфагновые болота. Тундровый биом был доминирующим, однако, в ~5800 кал. л.н. показатель таежного биома преобладал над тундровым. С начала субатлантического периода (~2200 кал. л.н.) растительность вокруг озера представлена южной тундровой растительностью с кустарниками (карликовая береза, ольха, ива) и осоково-сфагновыми болотами в низинах.

Ключевые слова: голоцен, пыльца и споры, реконструкция биомов, озерные отложения, палеоэкология, субарктическая тундра

Для цитирования: Нигаматзянова Г.Р., Нигматуллин Н.М., Фролова Л.А. Пыльцевой анализ в реконструкции палеораствительности юго-западной части полуострова Ямал // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 757-760. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-757

Спорово-пыльцевой анализ позволяет получить представление об изменениях растительности и климатических условий прошлого (Rudaya et al., 2021; Nigamatzyanova et al., 2022). В этой статье приводятся результаты реконструкции растительного покрова юго-западной части полуострова Ямал за последние ~6000 кал. л. на основе новых палинологических данных безымянного тундрового озера бассейна р. Еркута с кодовым названием 21-Уа-02. Район исследований расположен в подзоне южной субарктической тундры, где широко распространены тундрово-болотные комплексы (Юрцев, 1978). 67-см колонка донных отложений была отобрана в 2021 году в центральной части водоема с глубины 4,3 м (координаты точки отбора 68°09.897' с.ш., 68°57.602' в.д.). 25 образцов были подвергнуты палинологическому анализу с использованием метода Фаэгри-Иверсена (Faegri and Iversen, 1989). Реконструкция биомов проводилась в соответствии с методом Prentice et al. (1996). В общей сложности идентифицировано 34 пыльцевых (11 древес-

ных, 18 травянистых) и 5 споровых палиноморфа. Пыльцевые спектры характеризовались доминированием пыльцы древесных таксонов (*Betula sect. Nanae*, *Betula sect. Albae*, *Alnus*). Среды травянистых таксонов преобладала пыльца *Cyperaceae*. Пыльца *Artemisia*, *Poaceae*, *Rubus chamaemorus* характеризовалась постоянным присутствием по всей толще колонки отложений. Споры *Sphagnum* составляли большую часть споровых палиноморф. Отмеченные таксоны являются типичными для тундровых ландшафтов. Радиоуглеродное датирование образцов донных отложений, проведенное в Национальном Тайваньском университете (Лаборатория NTUAMS, Тайпэй, Тайвань) позволило оценить общий возраст колонки отложений ~6000 кал. л. Согласно полученным данным, выявлено доминирование тундровой растительности. Качественная интерпретация палинологической диаграммы подтверждается количественной реконструкцией доминирующего тундрового биома. Высокая концентрация пыльцы в диапазоне ~6000-5100 кал. л.н. свидетельствует

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: GuRNigamatzyanova@kpfu.ru (Г.Р. Нигаматзянова)

Поступила: 22 июня 2024; Принята: 19 августа 2024;
Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



об относительно благоприятных климатических условиях, что должно соответствовать оптимуму голоцена (Andreev and Klimanov, 2000; Andreev et al., 2001 и др.). В пыльцевых спектрах доминировала пыльца березы, ивы, ольхи и вересковых. Были широко распространены осоко-сфагновые болота. Выявлено кратковременное повышение таежного биома ~5800 кал. л.н. Начиная с ~2200 кал. л.н. растительность вокруг озера начала приобретать современный облик южной тундры, характеризующийся широким распространением кустарников (карликовая береза, ольха, ива) и низинных моховых болот, что совпадает с началом субатлантического периода (Andreev et al., 2024). Реконструкция биомов отражает сокращение таежного биома и расширение до максимальных значений тундрового биома.

Благодарности

Палинологический анализ проведен в рамках Программы стратегического академического лидерства Казанского федерального университета «Приоритеты-2030».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Юрцев Б.А. 1978. Арктическая флористическая область. Ленинград: Наука.
- Andreev A.A., Klimanov V.A. 2000. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia. *Journal of Paleolimnology* 24: 81–91.
- Andreev A.A., Manley W.F., Ingo'lfsson O'. et al. 2001. Environmental changes on Yugorski Peninsula, Kara Sea, Russia, during the last 12,800 radiocarbon years. *Global and Planetary Change* 31: 255–264.
- Andreev A.A., Tarasov P.E., Lenz M. et al. 2024. Environmental changes on the northern Taymyr Peninsula (Russian Arctic) during the last 62 ka inferred from the lacustrine pollen record. *Boreas*. DOI: [10.1111/bor.12657](https://doi.org/10.1111/bor.12657)
- Faegri K., Iversen J. 1989. Textbook of pollen analysis. Chichester: Publisher John Wiley and Sons.
- Nigamatzyanova G.R., Nigmatullin N.M., Valieva E.A. et al. 2022. The dynamics of vegetation and environmental conditions in the southern Yamal Peninsula during the Holocene inferred from the palynological analysis of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1512-1514. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-1512](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1512)
- Prentice I.C., Guiot J., Huntley B. et al. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Climate Dynamics*. 12: 185–194.
- Rudaya N., Nazarova L., Frolova L. et al. 2021. The link between climate change and biodiversity of lacustrine inhabitants and terrestrial plant communities of the Uvs Nuur Basin (Mongolia) during the last three millennia. *The Holocene* 31 (9): 1–16. DOI: [10.1177/09596836211019093](https://doi.org/10.1177/09596836211019093)

Correlation of small isolated reservoirs in the Zaonezhsky Peninsula area with the Onega Ice Lake level changes

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYOrlov A.V.^{1,2*}, Potakhin M.S.^{1,2}, Subetto D.A.¹¹The Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika River Embankment, 48, St. Petersburg, 191186, Russia²Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, Alexander Nevsky pr., 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. The article discusses data on the lithological composition of bottom sediments from two small lakes – Lake Lavkozero and Lake Gangozero, located on the Zaonezhsky Peninsula, within the area of the Onega Ice Lake. In the recovered sediment sequences from studied lakes, two sediment units from top to down have been recognized: Holocene gyttja from small isolated lakes and Late Pleistocene sediments from the Onega Ice Lake, which are represented by varved clays and silts. Based on lithological data, a “pink horizon” of varved clays was identified. It is similar to one which found in the sediment section of the Unitskaya Bay in Lake Onega. The absolute hypsometric position of this “pink horizon” was determined based on the elevation levels of the lakes under study.

Keywords: lacustrine sedimentation, late Pleistocene, bottom sediments, varved clays, Onega Ice Lake

For citation: Orlov A.V., Potakhin M.S., Subetto D.A. Correlation of small isolated reservoirs sediments in the Zaonezhsky Peninsula area in the context of the Onega Ice Lake level changes // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 761-766. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-761

1. Introduction

Lake Lavkozero (N 62.645763, E 34.359239) and Lake Gangozero (N 62.637677, E 34.361123) are located in the Kondopoga District of the Republic of Karelia, approximately 7 km northwest of the village of Unitsa. Their elevations are 59.9 m and 75 m above sea level, respectively. These lakes have a narrow, elongated shape, running from northwest to southeast. Lake Lavkozero has a maximum length of 1 km and a width that does not exceed 200 m. Lake Gangozero is ca. 530 m in length and 150 m in width. The research area is situated in the northern part of the Onega Lake basin, whose current level is 33 m. The Onega Lake basin experienced significant changes during the final stages of the Late Pleistocene and Early Holocene, associated with glacial degradation and the formation of a huge glacial lake – Onega Ice Lake (OIL). According to Demidov (2005), OIL reached its maximum size around 13,300 years ago. The deposits from this period are represented by varved clays. As a result of glacial retreat and a change in the direction of lake currents, the hydrochemical conditions changed dramatically. This led to the oxidation of upper sediment layers and the formation of a “pink horizon” of clays, with a thickness

ranging from 10 to 30 centimeters, within the boundaries of the Onega lake (Demidov, 2004).

2. Materials and methods

The sampling of sediment cores from the studied lakes was conducted using a Russian Peat Corer with a corer length of 1 meter and diameter 7.5 and 5 cm. A lithological description was made for the selected cores on site. Sediment samples were taken with superimposition in order to create continuous sequence of bottom sediment. In Lake Lavkozero, a sequence of sediment with a thickness of 5.83 meters (4.5 - 10.33 meters from the water surface) was collected at a depth of 4.5 meters. In Lake Gangozero, a sediment column with a capacity of 2.7 meters (2.5 - 5.2 meters from the water's surface) was obtained at a depth of 2.5 meters. Both studied sections showed that the exposed sediments at the top are composed of Holocene deposits characteristic of small isolated reservoirs (gyttja). The underlying sediments are composed of Onega Ice Lake deposits (varved clays and silts). A “pink horizon” of varved clay with a thickness of 20 centimeters in Lake Lavkozero and 5 centimeters in Lake Gangozero has

*Corresponding author.

E-mail address: 95orlov@rambler.ru (A.V. Orlov)

Received: June 26, 2024; **Accepted:** August 19, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



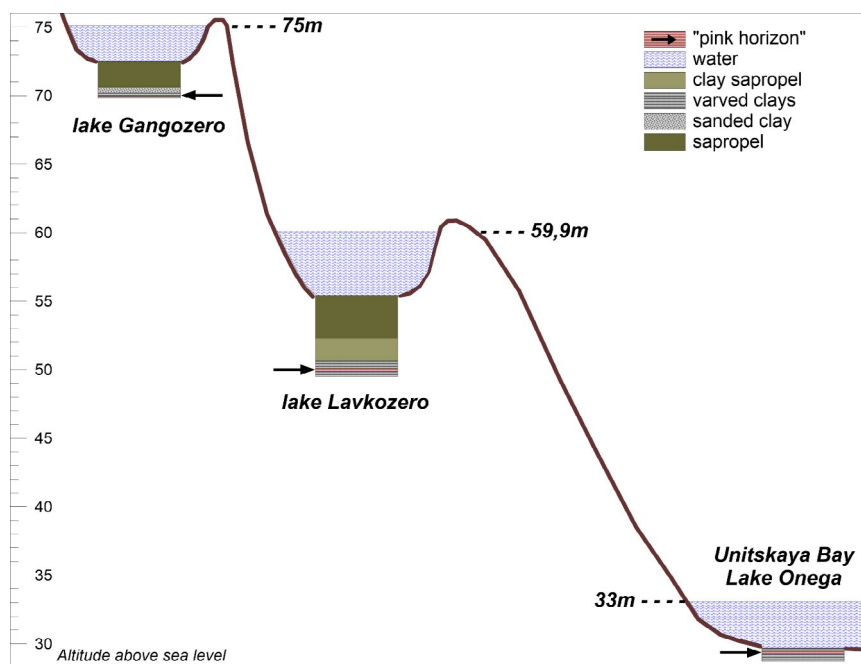


Fig.1. Diagram of the hypsometric distribution of the studied lakes.

been found in sections of the bottom sediments (Figure 1). The determination of the occurrence level of this “pink horizon” in these sections allowed us to correlate them with a similar horizon found in the sediments of the Unitskaya Bay, Lake Onega (Subetto et al., 2022).

3. Results and discussion

In modern research, a “pink horizon” has been discovered in a drilling well located in Petrozavodsk Bay, as well as in several wells in the open part of Lake Onega and the upper reaches of the Unitskaya Bay. The thickness of this horizon in different sections does not exceed 20 centimeters. It has been noted that the lower contact of the horizon is often more abrupt, while the upper contact is relatively gradual (Subetto et al., 2022). The formation of this horizon is associated with a sudden drop of the Onega Ice Lake level by 20-25 meters, which occurred due to the opening for a short period of a new influx of water into the White Sea basin about 11.2 thousand years ago. The timeframe for the formation of the pink horizon deposits was also relatively brief, as demonstrated by their low thickness (Demidov, 2006). Based on more recent data, the age of this horizon has been estimated to be between 13 and 13.2 thousand years (Hang et al., 2019). The deposits of the “pink horizon” differ significantly from the clays above and below it in terms of their geochemical composition. The mineral composition of the varved clays from the “pink horizon” indicates significant changes in the environmental conditions in the catchment area during their formation (Strakhovenko et al., 2018).

4. Conclusions

As a result of studying the bottom sediments of small lakes on the Zaonezhsky Peninsula, a “pink horizon” of varved clay was discovered in sections of Lake

Lavkozero and Lake Gangozero, and similar deposits were found in a section of the Unitskaya Bay of Lake Onega. These sections of sediment contain information about the timing of the isolation of these small lakes from the main body of water of Onega Ice Lake, which is necessary for a reliable reconstruction of the Late Glacial history of the area and determining the boundaries and stages of the glacial lake’s regression. The deposits of the “pink horizon” varved clay represent a valuable marker horizon, as they have a short duration of formation, which enhances their significance for reconstructing changes in the glacial lake level.

Acknowledgements

The research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-17-00206 <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Demidov I.N. 2005. Degradation of the Late Valdai glaciation in the Onega Lake basin. *Geology and Minerals of Karelia* 8: 134-142 (in Russian)
- Demidov I.N. 2004. Bottom sediments and fluctuations in the level of Lake Onega in the Late Glacial period. *Geology and Minerals of Karelia* 7: 207-218 (in Russian)
- Subetto D.A., Belkina N.A., Strakhovenko V.D. et al. 2022. Paleolimnology of Lake Onega: from a glacial lake to modern conditions. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. DOI: [10.17076/m-onegopa-leo23](https://doi.org/10.17076/m-onegopa-leo23) (in Russian)
- Demidov I.N. 2006. On the maximum stage of development of the Onega glacial lake, changes in its level and glaciostatic elevation of the coasts in the Late Glacial period. *Geology and Minerals of Karelia* 9: 171-180 (in Russian)

Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. 2019. A local clay-varve chronology of Onega Ice lake, NW Russia. *Quaternary International* 524: 13-23. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021)

Strakhovenko V.D., Subetto D.A., Ovdina E.A. et al. 2018. Modern bottom sediments of Lake Onega: structure, mineral composition and systematics of rare earth elements. *Reports of the Academy of Sciences* 481 (4): 1-4 (in Russian)

Корреляция отложений малых изолированных водоемов Заонежского полуострова в контексте изменения уровня Онежского приледникового озера

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYОрлов А.В.^{1,2*}, Потахин М.С.^{1,2}, Субетто Д.А.¹¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 191186 Санкт-Петербург, наб. реки Мойки 48² Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, 185030 Петрозаводск, пр. Александра Невского 50

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены особенности строения донных отложений двух малых озер Заонежского полуострова: Лавкозеро и Гангозеро (Республика Карелия), расположенных в пределах распространения Онежского приледникового озера (14-12 тыс.л.н.). Разрезы донных отложений озер Лавкозеро и Гангозеро представлены голоценовыми отложениями малых изолированных водоемов, перекрывающие позднеплейстоценовые отложения Онежского приледникового озера. Последние представлены ленточнослоистыми глинами и алевритами. На основе литологического описания разрезов выделен маркирующий «розовый горизонт» в ленточных глинах, аналогичный вскрытому в разрезе отложений Уницкой губы Онежского озера. По данным уровней отметок исследуемых озер определено абсолютное гипсометрическое положение «розового горизонта» во вскрытых разрезах.

Ключевые слова: озерное осадконакопление, поздний неоплейстоцен, донные отложения, ленточные глины, Онежское приледниковое озеро

Для цитирования: Орлов А.В., Потахин М.С., Субетто Д.А. Корреляция отложений малых изолированных водоемов Заонежского полуострова в контексте изменения уровня Онежского приледникового озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 761-766. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-761

1. Введение

Озера Лавкозеро (N 62.645763, E 34.359239) и Гангозеро (N 62.637677, E 34.361123) расположены в Кондопожском районе Республики Карелия в 7 км северо-западнее деревни Уница на высотных отметках 59,9 и 75 метров над уровнем моря соответственно. Эти озера имеют узкие, вытянутые с северо-запада на юго-восток котловины. Максимальная длина оз. Лавкозеро составляет 1 км, ширина не превышает 200 м. Озеро Гангозеро в длину достигает 530 м, максимальная ширина составляет 150 м. Район исследования расположен в северной части бассейна Онежского озера, современный уровень которого составляет 33 м. Бассейн Онежского озера на завершающих этапах позднего неоплейстоцена и в начале голоцена претерпевал значительные изменения, связанные с деградацией ледника и развитием приледникового водоема (Демидов, 2005; Субетто и др., 2022). Онежское приледнико-

вое озеро (ОПО) достигло своих максимальных размеров около 13,3 тыс. л. н. Отложения того периода представлены типичными ленточнослоистыми глинами. В результате регрессии ОПО и кардинальной смены направления течений в озере резко изменилась гидрохимическая обстановка, что, по мнению И.Н. Демидова вызвало окисление верхних горизонтов донных отложений и привело к формированию «розового горизонта» ленточных глин мощностью 10-30 см, широко распространенного в границах ОПО (Демидов, 2004).

2. Материалы и методы

Отбор кернов донных отложений исследуемых озер проводился при помощи торфяного бура (Russian Corer) с длиной пробоотборной части 1 м и диаметром 7,5 и 5 см. Для отобранных кернов в полевых условиях было выполнено литостратигра-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: 95orlov@rambler.ru (А.В. Орлов)

Поступила: 26 июня 2024; Принята: 19 августа 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



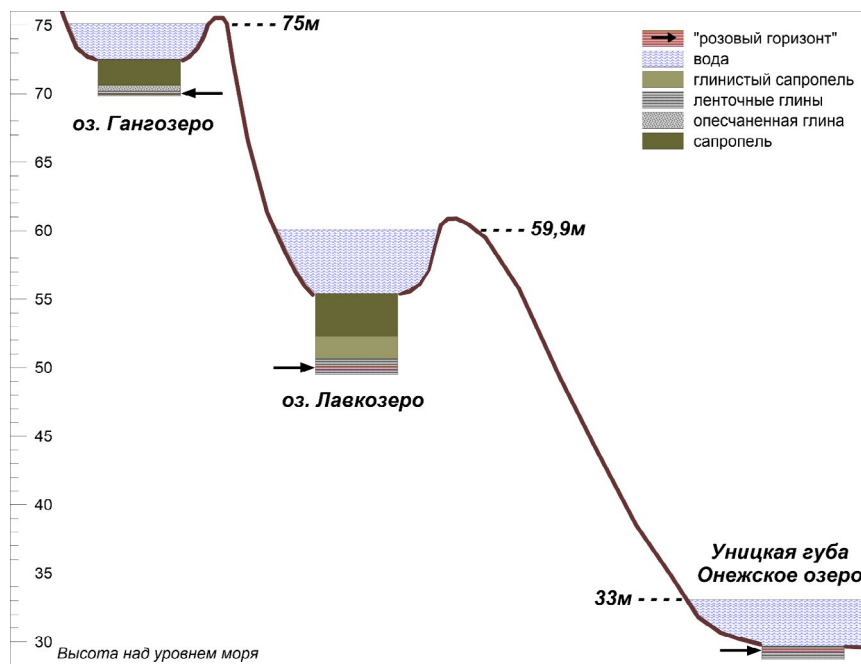


Рис.1. Схема гипсометрического расположения исследуемых озер

фическое описание и их фотографирование. Отбор кернов производился с наложением для формирования непрерывных колонок донных отложений. В озере Лавкозеро в точке с глубиной 4,5 м была отобрана колонка отложений мощностью 5,83 м (4,5 – 10,33 м, где 4,5 м от поверхности воды). В озере Гангозеро в точке с глубиной 2,5 м была отобрана колонка донных отложений мощностью 2,7 м (2,5 – 5,2 м от поверхности воды). В обоих исследованных разрезах вскрыты отложения в верхней части разреза представлены пачкой голоценовых осадков, характерных для малых изолированных водоемов (бурый, алевро-пелитовый сапропель). Нижележащая пачка отложений представлена отложениями ОПО (ленточные глины и алевролиты). В разрезах донных отложений был обнаружен «розовый горизонт» ленточных глин мощностью 20 см в озере Лавкозеро и 5 см в озере Гангозеро (рис. 1). Определение уровня залегания «розового горизонта» в исследованных разрезах позволило провести их корреляцию с аналогичным горизонтом, вскрытым в отложениях Уницкой губы Онежского озера (Субетто и др., 2022).

3. Результаты и обсуждение

В современных исследованиях «розовый горизонт» был обнаружен в буровой скважине в Петрозаводской губе, в ряде скважин в открытой части Онежского озера и в верховьях Уницкой губы. Мощности «розового горизонта» в разрезах не превышали 20 см. Отмечено, что нижний контакт резкий, а верхний постепенный (Субетто и др., 2022). Формирование «розового горизонта» связывается с резким падением уровня ОПО на 20-25 м в связи с открытием на относительно короткий срок нового порога стока в Беломорскую котловину около 11,2 тыс. л.н. Период формирования отложений «розового горизонта» так же был относительно коротким,

о чем говорит его малая мощность (Демидов, 2006). По более современным данным возраст «розового горизонта» оценивается в 13 – 13,2 тыс. л.н. (Hang et al., 2019). Отложения «розового горизонта» достаточно сильно отличаются от выше и ниже лежащих ленточных глин по геохимическому составу. Изменения в минеральном составе ленточных глин «розового горизонта» указывает на существенные изменения условий среды на водосборе ОПО в период их формирования (Страховенко и др., 2018).

4. Заключение

В результате исследования донных отложений малых озер в районе Заонежского полуострова было выявлено наличие «розового горизонта» ленточных глин в разрезах озер Лавкозеро (59,9 м) и Гангозеро (75 м), аналогичные отложения вскрыты в разрезе в Уницкой губе Онежского озера. Полученные разрезы донных отложений содержат информацию о времени изоляции малых озер от основной акватории ОПО, необходимую для достоверной реконструкции позднеледниковой истории региона, определения границ распространения приледникового водоема и этапов его регрессии. Таким образом, отложения «розового горизонта» ленточных глин являют собой качественный маркирующий горизонт. Кратковременность формирования данного слоя так же усиливает его значение для реконструкции изменения уровня приледникового водоема.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Демидов И.Н. 2005. Деградация поздневалдайского оледенения в бассейне Онежского озера. Геология и полезные ископаемые Карелии 8: 134-142.

Демидов И.Н. 2004. Донные отложения и колебания уровня Онежского озера в позднеледниковье. Геология и полезные ископаемые Карелии 7: 207-218.

Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д. и др., 2022. Палеолимнология Онежского озера: от приледни-

кового озера к современным условиям. Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук. DOI: [10.17076/m-onegopaleo23](https://doi.org/10.17076/m-onegopaleo23)

Демидов И.Н. 2006. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье. Геология и полезные ископаемые Карелии 9: 171-180.

Hang T., Gurbich V., Subetto D. et al. 2019. A local clay-varve chronology of Onega Ice lake, NW Russia. *Quaternary International* 524: 13-23. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.03.021](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.03.021)

Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Овдина Е.А. и др. 2018. Современные донные отложения Онежского озера: строение, минеральный состав и систематика редкоземельных элементов. Доклады Академии Наук 481 (4): 1-4.

GIS-based reconstructions of Lakes Onego and Ladoga development in the Late Pleistocene



Potakhin M.S.^{1,2*}, Zobkov M.B.¹, Kublitsky Yu.A.², Anisimov N.V.^{2,3}, Subetto D.A.²

¹ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Center of the RAS, Petrozavodsk, 185030, Russia

² Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, 191186, Russia

³ Vologda State University, Vologda, 160000, Russia

ABSTRACT. The article provides a review of GIS-based reconstructions of the development of Lakes Onego and Ladoga in the Late Pleistocene. It is shown that recently GIS methods have been used for reconstructions. At the moment, there are three GIS-based paleoreconstructions of the study area (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Anisimov, Minina, 2020). All reconstruction used DEMs and digital bathymetry models of lakes. However, areas, volumes, maximum, and average depths for various stages of lake development are calculated only for Lake Onego (Zobkov et al., 2019; Paleolimnology..., 2022).

Keywords: Lake Onego, Lake Ladoga, Late Pleistocene, ice lakes, GIS, paleoreconstruction

For citation: Potakhin M.S., Zobkov M.B., Kublitsky Yu.A., Anisimov N.V., Subetto D.A. GIS-based reconstructions of Lakes Onego and Ladoga development in the Late Pleistocene // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 767-772. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-767

1. Introduction

The ice sheet retreating after the Last Glacial Maximum has contributed to the forming and development of huge ice lakes – the Baltic Ice Lake (including Lake Ladoga) and the Onego Ice Lake. The largest and well studied proglacial lake in Europe is Baltic Ice Lake (Björck, 1995). It was formed as an ice-dammed lake in the process of melting of the southern part of the Scandinavian Ice Sheet. The history of relatively small ice-lakes associated with southeastern and eastern flanks of the ice sheet, as well as melt water volumes and drainage routings remain unclear (Mangerud et al., 2004).

Lakes Onego and Ladoga are located in the tectonic depressions in the contact zone of the Fennoscandian Crystalline Shield and Russian Platform. Mainly tectonic forces formed the depressions; however, Pleistocene glaciations significantly affected their structure. Lake depressions were repeatedly enveloped by ice streams during glaciations and by freshwaters and brackish waters during interglacial periods (Svendsen et al., 2004). In the Late Glacial time the lake depressions were filled with ice streams located in the southeastern part of the Scandinavian Ice Sheet. The retreat of the ice streams led to the formation of

proglacial lakes and its evolution during and after the ice sheet retreat. Several original models of the lake depressions development in the Late Pleistocene and the Holocene are presented for Lake Onego (Biske et al., 1971; Kvasov, 1975; Demidov, 2010) and Lake Ladoga (Kvasov, 1975; Koshechkin and Subetto, 2015). The models differently assessed sizes of the lakes, glacioisostatic uplift of the territory, and location and altitude of drainage thresholds. Recently, reconstructions of development of the lakes have been carried out using GIS methods (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Anisimov and Minina, 2020).

2. Materials and methods

Paleoreconstruction of large regions such as Lake Onego and Lake Ladoga and their catchments, it is advantageous to use the GIS method proposed by Leverington et al. (2002). To implement such as approach it is required to generate a single data layer for each modern topography and rebound surfaces. Both data layers must be georeferenced to each other and must be resampled to a common grid resolution, and contain values expressed with respect to a common datum. Modern topography layer needs to contain modern elevations together with contemporary

*Corresponding author.

E-mail address: mpotakhin@mail.ru (M.S. Potakhin)

Received: June 20, 2024; **Accepted:** August 19, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



lakes bathymetry resampled in uniform coordinate system, projection, datum and common grid. The historical water plane can be generated by subtracting the rebound surfaces from the modern topography.

All three reconstructions (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Anisimov and Minina, 2020) used digital elevation models (DEMs). For example, when creating a digital model for reconstructions of Lake Onego (Zobkov et al., 2019), the primary source of the modern elevations was the JdF DEM with spatial resolution three arc seconds (Kirmse and de Ferranti, 2017). The digital lake bathymetry model was compiled using depth measurements, digitized manually from navigation charts of Lake Onego and the River Svir' (Potakhin et al., 2024). Thus, modern topography DEM of lake's watershed and depression was obtained. Ice margin positions were used only for proglacial stages of the lake development in the Late Glacial time. Isobase values for Late Pleistocene period were adopted from study of Demidov (2010). For the Holocene period seven isobase values were employed to reconstruct every climatic period. Isobases were obtained from relict shoreline terraces (Biske et al., 1971).

3. Results and discussions

Gorlach et al. (2017) carried out small-scale reconstructions of the two initial stages (14.4 and 13.8 cal ka BP) of the Lakes Onego and Ladoga formation and determined lake's areas and volumes. Anisimov and Minina (2020) reconstructed 10 stages of the Lakes Onego and Ladoga development in the Late Pleistocene and Holocene (16.0-2.5 cal ka BP). However, the areas and volumes of lakes for the stages were not calculated. Zobkov et al. (2019) reconstructed maps of 12 stages of Lake Onego development in the Late Pleistocene and the Holocene (14.5-3.0 cal ka BP) which are available online (<http://arcg.is/0Kyr9a>). Area, volume, maximum, mean depth, and dynamics of water fluctuation of the lake was determined at each stages of its development. The discrepancies in ice-marginal positions and time scales were found to be major factors affecting the area and volume uncertainties between present and previous studies. Subsequently, the contemporary postglacial rebound model ICE-6G (Argus et al., 2014) was used to reconstruct the development of the Lake Onego catchment area (Fig. 1). The use of the postglacial rebound model also made it possible to calculate the depth of cutting of hydrographic network and estimate sediments sources and budget (Zobkov et al., 2020).

4. Conclusions

The use of GIS methods made it possible to reconstruct the development of lakes in the Late Pleistocene and the Holocene. Recently, there are three GIS-based paleoreconstructions of Lakes Onego and Ladoga (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Anisimov and Minina, 2020). All reconstruction used DEMs and digital bathymetry models of lakes. However, areas, volumes, maximum, and average depths for various stages of lake development are calculated only for Lake

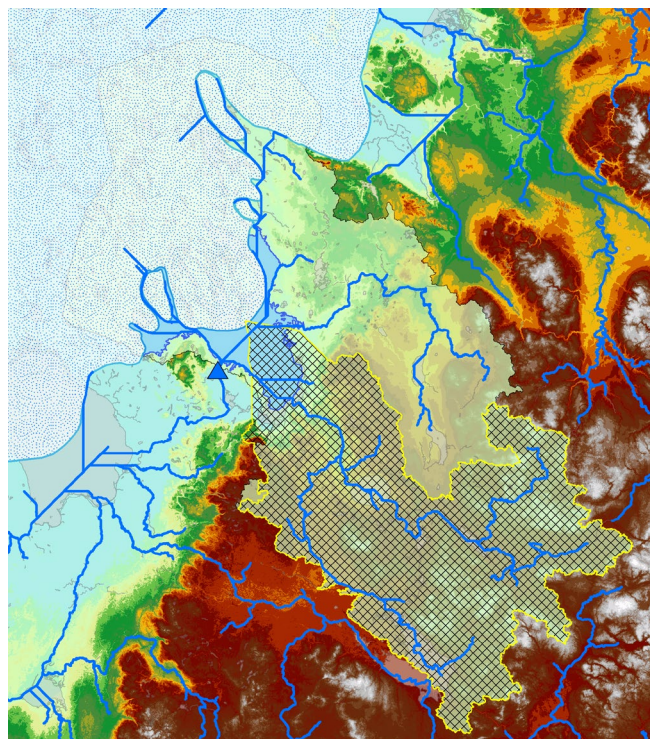


Fig.1. The Lake Onego' watershed and hydrographic network 14.5 cal ka BP (Paleolimnology..., 2022)

Onego (Zobkov et al., 2019). It is planned to carry out a general paleoreconstruction of the lakes and their catchments, including using the postglacial rebound model ICE-6G (Argus et al., 2014), to determine morphometric characteristics for different stages of development.

Acknowledgements

The study was supported by the Russian Science Foundation (24-17-00206).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anisimov N.V., Minina M.V. 2020. Reconstructions of paleobasins of large lake systems of the southeastern periphery of the Scandinavian Ice Sheet in the Late Pleistocene. *Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. Vol. 7. P. 264-268.
- Argus D.F., Peltier W.R., Drummond R. et al. 2014. The Antarctica component of postglacial rebound model ICE-6G_C (VM5a) based upon GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories. *Geophys. J. Int.* 198(1): 537-563.
- Biske G.S., Lak G.T., Lukashov A.D. et al. 1971. Structure and history of the Onego Lake depression. *Petrozavodsk*. 74 p. (in Russian)
- Björck S. 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0-8.0 BP. *Quatern Int.* 27:19-40.
- Demidov I.N. 2010. Stages of development of the Lake Onego depression. *Onego Lake. Atlas*. Petrozavodsk. P. 27-28. (in Russian)

Gorlach A., Hang T., Kalm V. 2017. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas* 46: 486-502.

Koshechkin B.I., Subetto D.A. 2015. Stages of development of Lake Ladoga in the late and post-glacial periods. Lake Ladoga and attractions of its coast. Atlas. St. Petersburg. P. 31-33. (in Russian)

Kirmse A., de Ferranti J. 2017. Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. *Prog Phys Geogr.* 41(6): 788-802.

Kvasov D.D. 1975. Late Quaternary history of large lakes and inland seas of Eastern Europe. Leningrad. 278 p. (in Russian)

Leverington D.W., Teller J.T., Mann J.D. 2002. A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography. *Comput Geosci.* 28(5): 631-639.

Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H. et al. 2004. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Sci Rev.* 23: 1313-1332.

Paleolimnology of Lake Onego: from the Onego Ice Lake to the present state. 2022. D. A. Subetto (ed.) Petrozavodsk. 331 p. (in Russian)

Potakhin M.S., Zobkov M.B., Belyaev P.Yu. 2024. New digital bathymetric model of Lake Onego (Verkhne-Svirskoe reservoir): development, verification, application. *Bulletin of St. Petersburg University. Geosciences.* 69 (1) (in Russian)

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. 2004. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Sci Rev* 23: 1229-1271.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D. et al. 2019. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *Journal of Paleolimnology.* 62(1): 53-71.

Zobkov M.B., Potakhin M.S., Subetto D.A. et al. 2020. Estimation of sediment sources and budget at Lake Onego watershed after the last glaciation with GIS modeling and sediment geochemistry. *Limnology and Freshwater Biology.* 4: 478-480.

ГИС-реконструкции развития Онежского и Ладожского озер в позднем неоплейстоцене

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYПотахин М.С.^{1,2*}, Зобков М.Б.¹, Кублицкий Ю.А.²,
Анисимов Н.В.^{2,3}, Субетто Д.А.²¹ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, 185030, Россия² Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, 191186, Россия³ Вологодский государственный университет, Вологда, 160000, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье представлен обзор реконструкций развития Онежского и Ладожского озер в позднем неоплейстоцене. Показано, что в настоящее время для реконструкций стали использовать ГИС-методы. На данный момент имеются три палеорекострукции исследуемой территории на ГИС основе (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Анисимов, Минина, 2020). Во всех реконструкциях использовались цифровые модели рельефа водосбора и цифровые батиметрические модели озер. Однако площади, объемы, максимальные и средние глубины для различных стадий развития рассчитаны только для Онежского озера (Zobkov et al., 2019; Палеолимнология..., 2022).

Ключевые слова: Онежское озеро, Ладожское озеро, неоплейстоцен, приледниковые озера, ГИС, палеорекострукции

Для цитирования: Потахин М.С., Зобков М.Б., Кублицкий Ю.А., Анисимов Н.В., Субетто Д.А. ГИС-реконструкции развития Онежского и Ладожского озер в позднем неоплейстоцене // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 767-772. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-767

1. Введение

Деграция ледникового покрова последнего оледенения способствовала образованию и развитию огромных приледниковых озер – Балтийского (включая Ладожское) и Онежского приледниковых озер. Самое крупное и хорошо изученное приледниковое озеро Европы — Балтийское озеро (Björck, 1995), образовалось как запрудное в процессе таяния южной части Скандинавского ледникового щита. История относительно небольших приледниковых озер, связанных с юго-восточными и восточными склонами ледникового щита, а также объемы талой воды и пути стока остаются неясными (Mangerud et al., 2004).

Онежское и Ладожское озера расположены в тектонических впадинах в зоне контакта Фенноскандинавского кристаллического щита и Русской осадочной плиты. Их котловины образованы в основном тектоническими силами, однако плейстоценовые оледенения существенно повлияли на их структуру. Озерные котловины неоднократно вмещали ледовые потоки во время оледенений, а

также пресные и соленые воды в межледниковье (Svendsen et al., 2004). В последнее оледенение котловины озер были заполнены ледовыми потоками юго-восточного склона Скандинавского ледникового щита. Отступление ледника привело к образованию приледниковых озер и их развитию. Для Онежского (Биске и др., 1971; Квасов, 1975; Демидов, 2010) и Ладожского (Квасов, 1975; Кошечкин и Субетто, 2015) озер представлено несколько оригинальных моделей развития их котловин в позднем неоплейстоцене и голоцене. Модели по-разному оценивают размеры озер, гляциоизостатическое поднятие территории, расположение и высоту порогов стока. В последнее время реконструкции развития озер проводятся с использованием ГИС-методов (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Анисимов и Минина, 2020).

2. Материалы и методы

Для палеорекострукций таких крупных регионов, как Онежское и Ладожское озера и их водосборы, целесообразно использовать ГИС-метод,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: mpotakhin@mail.ru (М.С. Потахин)

Поступила: 20 июня 2024; **Принята:** 19 августа 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



предложенный Леверингтоном и др. (Leverington et al., 2002). Для реализации этого подхода необходимо создать слой современного рельефа, т.е. цифровую модель рельефа (ЦМР) и слой поверхностей поднятия. Оба слоя данных должны иметь географическую привязку, одинаковое пространственное разрешение и единую систему координат. ЦМР должна содержать высотные отметки вместе с батиметрическими данными озер, преобразованными в единую систему координат и проекцию. Реконструированная водная поверхность может быть получена путем вычитания поверхностей поднятия из поверхности современного рельефа.

Во всех трех реконструкциях (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Анисимов и Минина, 2020) использовались ЦМР. Например, при реконструкции Онежского озера (Zobkov et al., 2019) основным источником современных высот послужила ЦМР JdF с пространственным разрешением три угловые секунды (Kirmse and de Ferranti, 2017). Цифровая батиметрическая модель была составлена на основе глубин, оцифрованных вручную с навигационных карт Онежского озера и реки Свирь (Потахин и др., 2024). Таким образом, была получена современная ЦМР водосбора и котловины озера. Положения края ледника использовались только для приледниковых этапов развития озера. Значения изобаз для позднего плейстоцена взяты из исследования Демидова (2010). Для периода голоцена для реконструкции каждого климатического периода использовались семь значений изобаз; изобазы получены от реликтовых береговых террас (Биске и др., 1971).

3. Результаты и обсуждения

Горлач и др. (Gorlach et al., 2017) провели мелкомасштабные реконструкции двух начальных этапов (14,4 и 13,8 кал. тыс. л.н.) формирования Онежского и Ладожского озер и определили площади и объемы озер. Анисимов и Минина (2020) реконструировали 10 этапов развития Онежского и Ладожского озер в позднем плейстоцене и голоцене (16,0-2,5 кал. тыс. л.н.); однако площади и объемы озер для этапов не рассчитывались. Зобков и др. (Zobkov et al., 2019) построили карты 12 этапов развития Онежского озера в позднем неоплейстоцене и голоцене (14,5-3,0 кал. тыс. л.н.), которые доступны в Интернете (<http://arctis.is/0Kyr9a>). Определены площадь, объем, максимальная, средняя глубина и их динамика на каждом этапе развития озера. Было обнаружено, что расхождения в положении границ льда и временных масштабах являются основными факторами, влияющими на расхождения площади и объема современных и предыдущих исследований. Затем была использована современная модель послеледниковой поверхности ICE-6G (Argus et al., 2014) для реконструкции развития водосбора Онежского озера (рис. 1). Применение этой модели позволило рассчитать глубину вреза гидрографической сети и оценить источники и баланс наносов (Zobkov et al., 2020).

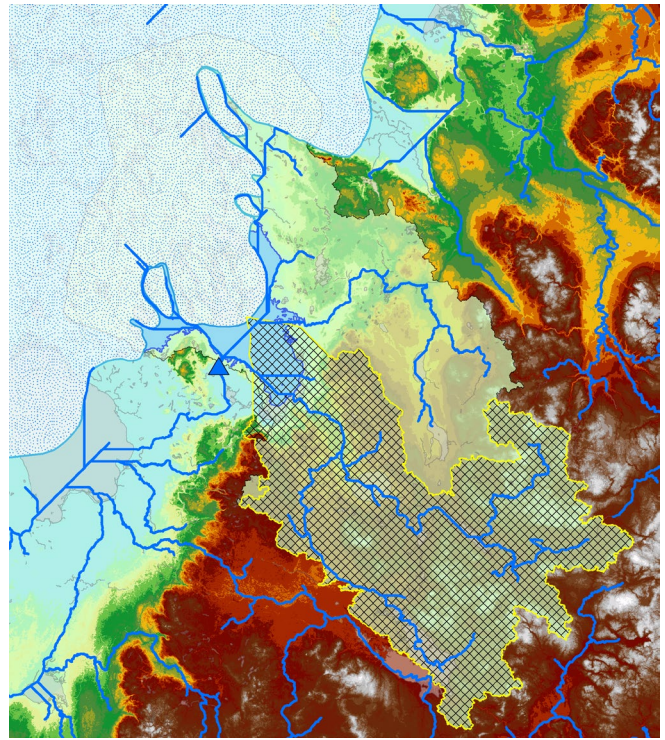


Рис.1. Водосбор и гидрографическая сеть Онежского озера 14,5 кал. тыс. л.н. (Палеолимнология..., 2022)

4. Выводы

Использование ГИС-методов позволяет реконструировать развитие озер в позднем неоплейстоцене и голоцене. В настоящее время имеются три палеорекострукции Онежского и Ладожского озер на ГИС основе (Gorlach et al., 2017; Zobkov et al., 2019; Анисимов и Минина, 2020). Во всех реконструкциях использовались ЦМР и цифровые батиметрические модели озер. Однако площади, объемы, максимальные и средние глубины для различных стадий развития рассчитаны только для Онежского озера (Zobkov et al., 2019). Планируется провести единую реконструкцию озер и их водосборов, в том числе с использованием модели послеледниковой поверхности ICE-6G (Argus et al., 2014) для определения морфометрических характеристик для разных стадий развития водоема.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00206.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Анисимов Н.В., Минина М.В. 2020. Реконструкции палеобассейнов крупных озерных систем юго-восточной периферии Скандинавского ледникового щита в позд-

нем плейстоцене. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. С. 264-268.

Биске Г.С., Лак Г.Ц., Лукашов А.Д. и др. 1971. Строение и история котловины Онежского озера. Петрозаводск. 74 с.

Демидов И.Н. 2010. Этапы развития котловины Онежского озера. Онежское озеро. Атлас. С. 27-28.

Квасов Д.Д. 1975. Позднечетвертичная история крупных озер и внутренних морей Восточной Европы. Л. 278 с.

Кошечкин Б.И., Субетто Д.А. 2015. Этапы развития Ладожского озера в позднее- и послеледниковый период. Ладожское озеро и достопримечательности его побережья. Атлас. СПб. С. 31-33.

Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. 2022. Субетто Д.А.(отв. ред.). Петрозаводск. 332 с.

Потахин М.С., Зобков М.Б., Беляев П.Ю. 2024. Новая цифровая батиметрическая модель Онежского озера (Верхне-Свирского водохранилища): разработка, верификация, применение. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 69 (1).

Argus D.F., Peltier W.R., Drummond R. et al. 2014. The Antarctica component of postglacial rebound model ICE-6G_C (VM5a) based upon GPS positioning, exposure age dating of ice thicknesses, and relative sea level histories. *Geophys. J. Int.* 198(1): 537-563.

Björck S. 1995. A review of the history of the Baltic Sea, 13.0-8.0 BP. *Quatern Int.* 27:19-40.

Gorlach A., Hang T., Kalm V. 2017. GIS-based reconstruction of Late Weichselian proglacial lakes in northwestern Russia and Belarus. *Boreas* 46: 486-502.

Kirmse A., de Ferranti J. 2017. Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. *Prog Phys Geogr.* 41(6): 788-802.

Leverington D.W., Teller J.T., Mann J.D. 2002. A GIS method for reconstruction of late Quaternary landscapes from isobase data and modern topography. *Comput Geosci.* 28(5): 631-639.

Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H. et al. 2004. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the Last Glaciation. *Quaternary Sci Rev.* 23: 1313-1332.

Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. 2004. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Sci Rev* 23: 1229-1271.

Zobkov M., Potakhin M., Subetto D. et al. 2019. Reconstructing Lake Onego evolution during and after the Late Weichselian glaciation with special reference to water volume and area estimations. *Journal of Paleolimnology.* 62(1): 53-71.

Zobkov M.B., Potakhin M.S., Subetto D.A. et al. 2020. Estimation of sediment sources and budget at Lake Onego watershed after the last glaciation with GIS modeling and sediment geochemistry. *Limnology and Freshwater Biology.* 4: 478-480.

Limno-glacial deposits: Sources of sediments and processes of sedimentation

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Subetto D.A.^{1*}, Strakhovenko V.D.^{1,2}, Belkina N.A.^{1,3}, Rybalko A.E.^{1,4,5},
Potakhin M.S.^{1,3}, Kublitskiy Yu.A.¹, Orlov A.V.^{1,3}, Kulik N.V.^{1,3},
Anisimov N.V.^{1,6}, Malov V.I.^{1,2}

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, 48 Moika Emb. 48, St.Petersburg, 191186, Russia

² V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Academician Koptyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

³ Northern Water Problems Institute KarRC RAS, 50 Alexander Nevsky Ave., Petrozavodsk, 185030, Russia

⁴ FGBU 'VNIOkeangeologiya', 1 Angliyskiy Pr., St.Petersburg, 190121, Russia

⁵ Institute of Earth Sciences SPBSU, 33-35, 10th line V.O. St.Petersburg, 199178, Russia

⁶ Vologda State University, 15 Lenina str., 160000, Vologda, Russia

ABSTRACT. The article presents the theoretical postulates of limno-glacial type of sedimentation and examines its features on the example of the Onego Ice Lake.

Keywords: limno-glacial deposits, sedimentogenesis, Onego Ice Lake

For citation: Subetto D.A., Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Rybalko A.E., Potakhin M.S., Kublitskiy Yu.A., Orlov A.V., Kulik N.V., Anisimov N.V., Malov V.I. Limno-glacial deposits: Sources of sediments and processes of sedimentation // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 773-778. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-773

1. Introduction

Limno-glacial deposits formed in large glacial basins at the boundary of the Late Pleistocene and Holocene are unique geological formations that have no modern analogues. The transition from the Last Glacial epoch to the Interglacial (the Holocene) was a time of active melting and reduction of the area of large ice sheets in the Northern Hemisphere – the Laurentian and Scandinavian Ice Sheets, as a result of which large glacial water basins with huge areas and depths and with huge water volumes were formed on their periphery. In the cold climate conditions of that time, a special type of sedimentogenesis was formed – nival, characterized by physical, frosty weathering, the dominance of erosive processes, the predominance of clastic material over biogenic (Strakhov, 1960).

2. Materials and methods

Paleogeographic and paleolimnological studies of the bottom sediments of Lake Onego in recent years have allowed us to obtain new data on the features of the formation of the Onego Ice Lake (OIL) and the conditions of limno-glacial sedimentation (Paleolimnology..., 2022).

*Corresponding author.

E-mail address: subettoda@herzen.spb.ru (D.A. Subetto)

Received: July 08, 2024; **Accepted:** August 19, 2024;

Available online: August 26, 2024

3. Results and discussion

Based on varvochronological studies of varved clays, it was revealed that they accumulated over 1150-1300 years in the time interval 14,500-13,000 years ago. The drainage basin of the OIL has undergone significant changes since its deglaciation. During the formation of the OIL, the Earth's surface, as a result of isostatic deformations, had a strong slope towards the glacier, which was reflected in the fundamentally different location of the surface runoff directions from the modern one and their orientation in the north-easterly direction towards the glacier. The area of the drainage basin about 14,500 years ago was more than 160 thousand km², which is about 2.6 times more than the modern one. At that time, the southern boundaries of the OIL catchment area were shifted 300 km south of their current position. The drainage basin of the OIL, and then of Lake Onego, gradually decreased due to the separation of its southern and south-eastern sections and reached its modern borders about 2500 years ago. During the Ice Age, the removal of detrital material was very large and significantly exceeded the modern one. For example, 12,000 years ago, the volume of

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



detrital material carried into the OIL basin could have amounted to 49.4 km³. At the same time, the southern segment of the catchment area, composed of sedimentary rocks of the Russian Platform (RP), could receive more than 3 times more detrital material than from the northern segment, represented by crystalline rocks of the Fennoscandian Crystalline Shield (FCS).

An assessment of the reserves of sedimentary matter of different genesis in the basin of Lake Onego showed that the amount of limno-glacial deposits (mineral silty-clay deposits with a laminated structure) reaches 52 km³ in volume, and 30,000 million tons of dry matter in mass. These figures are 5 and 10 times higher than similar characteristics for Holocene sediments (volume - 10 m³, weight - 3000 million tons of dry matter). The rate of accumulation of sedimentary matter in the basin of Lake Onego in the conditions of a nival climate (stage of OIL) was 2 orders of magnitude higher than the average rate of sedimentation in the Holocene.

A comparison of the distribution features of REE in varved clays with those in crystalline rocks of the FCS and sedimentary rocks of the RP allowed us to come to the following conclusions regarding their litho-geochemical features and formation settings: (1) the bottom sediments of Lake Onego are formed mainly due to sedimentary material formed by repeatedly redeposited weathering products of the crystalline rock massifs of the FCS and in to a lesser extent, deposits of the RP sedimentary cover (with the exception of limno-glacial deposits of the southern part of Lake Onego, where the role of sedimentary material received as a result of weathering of sedimentary rocks of the RP, when the drainage basin was significantly shifted to the south, is significant). A well-marked trend of changes in the spectra of REE distribution in bottom sediments in the Onego Lake water area has been revealed, with a gradual increase in the role of sedimentary rocks of the RP towards the Southern Onego and their complete predominance in the bottom sediments of the Southern Onego throughout the entire time of the lake's development.

Complex geochemical and mineralogical studies of the stratigraphically aged "pink horizon" in varved clays of the OIL (Fig. 1) and the horizon with shungite layers in the varved clays showed their identity, with differences in accessory minerals and the addition of dolomite and shungite to the main minerals in the lowest units. The main minerals are quartz and feldspar (mainly albite, oligoclase, microcline) of different dimensions, degree of edging, morphology, as well as large and small scales of chlorite, illite, muscovite, biotite, actinolite, and epidote. At the lower sharp contact of the "pink horizon" of varved clays, the amount of finely scaled chlorite and illite of a more ferruginous composition increases sharply. The gadolinium maximum, which is present for most of the varved clays of the OIL is especially high in varved clays of the "pink horizon".

The main characteristics of lake sedimentation in glacial lakes are given below: 1. The nival type of sedimentogenesis (Arctic, Subarctic climatic conditions); 2.

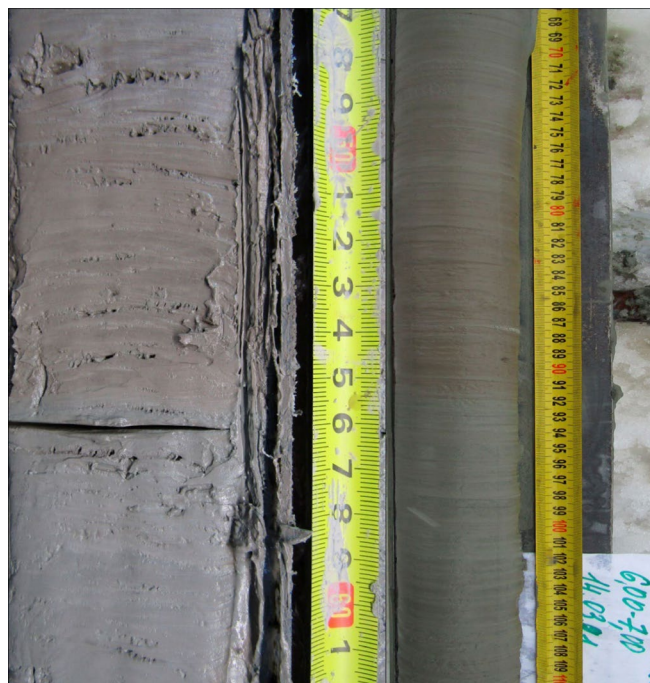


Fig.1. Photos of two sediment cores with "pink horizon" in varved clays of Onego Ice Lake.

Conditions of a large (huge), deep-water glacial lake in the peripheral zone of the Scandinavian Ice Sheet (Baltic Ice Lake (including Lake Ladoga), Onego Ice Lake, White Sea Glacial Lake); 3. Low water transparency (high content of suspended and entrained material) and, as a result, low bioproductivity of the lake ecosystem (oligotrophic (ultra-oligotrophic) type of lakes); 4. Low concentration of nutrients in bottom sediments (up to 1-2% of organic matter). Mineral composition of bottom sediments; 5. Intermittent vegetation cover on undeveloped soils in the catchment areas freed from glaciers of the Late Valdaian Glaciation. Open spaces, polar deserts; 6. The dominant role of erosive and Aeolian processes; 7. The dominant role of allochthonous material (coming from the catchment area) in the sedimentation process; 8. High sedimentation rates (an order of magnitude higher than modern sedimentation rates in lakes of the humid zone) from 1 to 10 mm or more per year; 9. Rhythmic accumulation of sediments (mixed nature of sedimentation: gravitational-turbidite, glacial-turbidite flows); 10. Laminated (rhythmic, annual) type of lake sediments; 11. Unprocessed profile of the lake bottom relief; 12. Instability and disequilibrium of the lake ecosystem; 13. The relatively short stage of lake-glacial sedimentation is 1000-2000 varved-years.

4. Conclusions

The formation of limno-glacial deposits (varved clays) in the conditions of large glacial lakes formed at the boundary of the Late Pleistocene and Holocene is characterized by unique natural and climatic conditions and features that currently have no analogues. On the example of the Onego Ice Lake, the features of the formation of varved clays and their material composition are shown.

Acknowledgements

The research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-77-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Paleolimnology of Lake Onego: From The Onego Ice Lake to the Present State. 2022. D. A. Subetto, N. A. Belkina, V. D. Strahovenko et al. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)

Strakhov N.M. 1960. Fundamentals of the theory of lithogenesis. Volume 1. Types of lithogenesis and their placement on the Earth's surface. – M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. (in Russian)

Озерно-ледниковые отложения: источники вещества, процессы формирования



Субетто Д.А.^{1*}, Страховенко В.Д.^{1,2}, Белкина Н.А.^{1,3}, Рыбалко А.Е.^{1,4,5},
Потахин М.С.^{1,3}, Кублицкий Ю.А.¹, Оролов А.В.^{1,3}, Кулик Н.В.^{1,3},
Анисимов Н.В.⁶, Малов В.И.^{1,2}

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, наб. р. Мойки, д. 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т акад. Коптюга, д. 3, Новосибирск, 630090, Россия

³ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, пр. Александра Невского, 50, Петрозаводск, 185030, Россия

⁴ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Английский пр., д.1, Санкт-Петербург, 190121, Россия

⁵ Институт наук о Земле СПбГУ, 10-я линия В.О., д.33-35, Санкт-Петербург, 199178, Россия

⁶ Вологодский государственный университет, пр. Ленина, д.15, Вологда, 196000, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье приводятся теоретические положения озерно-ледникового осадконакопления и рассматриваются его особенности на примере Онежского приледникового озера.

Ключевые слова: озерно-ледниковые отложения, седиментогенез, Онежское приледниковое озеро

Для цитирования: Субетто Д.А., Страховенко В.Д., Белкина Н.А., Рыбалко А.Е., Потахин М.С., Кублицкий Ю.А., Оролов А.В., Кулик Н.В., Анисимов Н.В., Малов В.И. Озерно-ледниковые отложения: источники вещества, процессы формирования // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 773-778. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-773

1. Введение

Озерно-ледниковые отложения, сформировавшиеся в крупных приледниковых бассейнах на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена, являются уникальными в своем роде геологическими образованиями, не имеющие современных аналогов. Переход от последней ледниковой эпохи к межледниковой (голоцену) был временем активного таяния и сокращения площади крупных ледниковых щитов в Северном полушарии – Лаврентийского и Скандинавского, в результате чего формировались на их периферии крупные приледниковые водоемы большой площади и глубины с огромными объемами водных масс. В холодных условиях климата того времени формировался особый тип седиментогенеза – нивальный, характеризовавшийся физическим, морозным выветриванием, господством эрозионных процессов, преобладанием кластического материала над биогенным (Страхов, 1960).

2. Материалы и методы

Палеогеографические и палеолимнологические исследования последних лет донных отложе-

ний Онежского озера позволили получить новые данные об особенностях формирования Онежского приледникового озера (ОПО) и условиях озерно-ледникового осадконакопления (Палеолимнология..., 2022).

3. Результаты и обсуждение

На основе варвохронологических исследований ленточных глин ОПО выявлено, что они накапливались на протяжении 1150-1300 лет во временном интервале 14500 -13000 лет назад. Водосборный бассейн ОПО претерпел существенные изменения со времени его дегляциации. В период формирования ОПО поверхность Земли в результате изостатических деформаций имела сильный наклон в сторону ледника, что отразилось в принципиально отличном от современного расположения направлений поверхностного стока и их ориентировании в северо-восточном направлении в сторону ледника. Площадь водосборного бассейна около 14500 лет назад составляла более 160 тыс. км², что примерно в 2,6 раза больше современного. Южные границы водосборного бассейна ОПО в то время были смещены на 300 км южнее от современ-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: subettoda@herzen.spb.ru (Д.А. Субетто)

Поступила: 08 июля 2024; Принята: 19 августа 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ного их положения. Водосборный бассейн ОПО, а затем и Онежского озера постепенно уменьшался за счет отчленения южных и юго-восточных его участков и достиг современных границ около 2500 лет назад. В ледниковую эпоху вынос обломочного материала был очень велик и существенно превышал современный. Например, 12000 лет назад объем обломочного материала, выносимого в котловину ОПО, мог составить 49,4 км³. При этом с южного сегмента водосбора, сложенного осадочными породами Русской плиты, могло поступать обломочного материала более чем в 3 раза больше, чем с северного сегмента, представленного кристаллическими породами Фенноскандинавского щита.

Оценка запасов осадочного вещества разного генезиса в котловине Онежского озера показала, что количество позднеледниковых, озерно-ледниковых отложений (минеральные алевритово-глинистые отложения со слоистой структурой) достигает в объеме 52 км³, а в массе – 30000 млн. т сухого вещества. Эти цифры в 5 и в 10 раз превышают аналогичные характеристики для голоценовых илов (объем - 10 км³, масса - 3000 млн. т сухого вещества). Скорость накопления осадочного вещества в котловине Онежского озера в условиях нивального климата (стадия ОПО) на 2 порядка превышала среднюю скорость осадконакопления в голоцене.

Сравнение особенностей распределения РЗЭ в ленточных глинах с таковыми в кристаллических породах Фенноскандинавского щита и осадочных пород Русской плиты позволило прийти к следующим выводам относительно их литогеохимических особенностей и обстановок формирования: (1) донные отложения Онежского озера образованы, в основном, за счет осадочного материала, сформированного многократно переотложенными продуктами выветривания массивов кристаллических пород щита и в меньшей степени отложениями платформенного осадочного чехла (за исключением озерно-ледниковых отложений южной части Онежского озера, где существенна роль осадочного материала, поступившего в результате выветривания осадочных пород Русской платформы, когда водосборный бассейн был существенно смещен на юг). Выявлен хорошо выраженный тренд изменения спектров распределения РЗЭ в донных отложениях по акватории Онежского озера, с постепенным увеличением в них роли осадочных пород Русской платформы к Южному Онегу и полное преобладание их в донных отложениях Южного Онега на протяжении всего времени развития озера.

Комплексные геохимические и минералогические исследования стратиграфически выдержанного «розового горизонта» в ленточных глинах ОПО (Рис. 1) и горизонта с шунгитовыми слоями в ленточных глинах показали их идентичность, с отличиями по аксессуарным минералам и добавлением к основным минералам доломита и шунгита в самых нижних пачках.

Основные минералы – это кварц и полевые шпаты (преимущественно альбит, олигоклаз, микроклин) разной размерности, степени окатан-

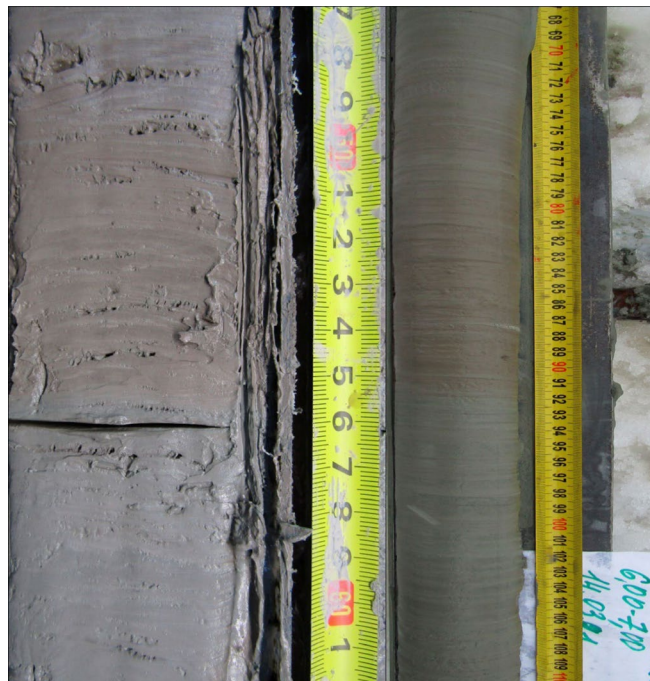


Рис.1. Фотографии двух колонок донных отложений с «розовым горизонтом» в ленточных глинах Онежского приледникового озера

ности, морфологии, а также крупные и мелкие чешуйки хлорита, иллита, пластинки мусковита, биотита, актинолита и эпидота. На нижнем резком контакте «розового горизонта» ленточных глин резко возрастает количество мелкочешуйчатого хлорита и иллита более железистого состава. Гадолиниевый максимум, который присутствует для большей части ленточных глин ОПО, особенно велик в ленточных глинах «розового горизонта».

Ниже приводятся основные характеристики озерного осадконакопления в приледниковых водоемах: 1. Нивальный тип седиментогенеза (арктические, субарктические климатические условия); 2. Условия крупного (гигантского), глубоководного приледникового озера в периферийной зоне Скандинавского ледникового щита (Балтийское ледниковое озеро (включая Ладогу), Онежское приледниковое озеро, Беломорское приледниковое озеро); 3. Низкая прозрачность воды (высокое содержание взвешенного и влекомого материала) и, как следствие, низкая биопродуктивность озерной экосистемы (олиготрофный (ультра-олиготрофный) тип озер); 4. Низкая концентрация биогенных элементов в донных отложениях (до 1-2% органического вещества). Минеральный состав донных отложений; 5. Прерывистый растительный покров на неразвитых почвогрунтах в зонах водосборного бассейна, освобожденных от ледников последнего валдайского оледенения. Открытые пространства, полярные пустыни; 6. Господствующая роль у эрозийных и эоловых процессов; 7. Господствующая роль аллохтонного материала (поступающего с водосборного бассейна) в процессе осадконакопления; 8. Высокие скорости осадконакопления (на порядок выше современных скоростей седимента-

ции в озерах гумидной зоны) от 1 до 10 мм и более в год; 9. Ритмичное/пульсационное накопление отложений (смешанный характер осадконакопления: гравитационно-турбидитовый, ледниково-мутевые потоки); 10. Ленточный (ритмичный, годичный) тип озерных отложений; 11. Невыработанный профиль рельефа дна озера; 12. Неустойчивость, неравновесность озерной экосистемы; 13. Относительно непродолжительный этап озерно-ледникового осадконакопления – 1000-2000 варво-лет.

4. Заключение

Формирование озерно-ледниковых отложений (ленточных глин) в условиях крупных приледниковых водоемов, формировавшихся на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена, характеризуется уникальными природно-климатическими условиями и особенностями, аналогов которым в настоящее время нет. На примере Онежского приледникового озера показаны особенности формирования ленточных глин и их вещественного состава.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 24-77-00206, <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

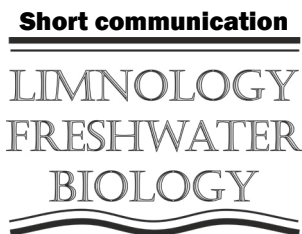
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. 2022. Д. А. Субетто, Н. А. Белкина, В. Д. Страховенко и др. Петрозаводск: Карельский научный центр Российской академии наук.
- Страхов Н.М. 1960. Основы теории литогенеза. Том 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности Земли. – М.: Издательство Академии наук СССР.

Characteristics of environmental conditions during the accumulation of lake bottom sediments in the Mustatunturi ridge area (Kola region)



Tolstobrova A.N.^{1*}, Tolstobrov D.S.¹, Shikhirina K.A.²

¹ Geological Institute of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 14, Fersman Str., 184209 Apatity, Russia

² Herzen State Pedagogical University, 48 Moika Embankment, St. Petersburg, 191186, Russia

ABSTRACT. A comprehensive study (lithological study, diatom analysis, radiocarbon dating, grain-size and loss on ignition (LOI) analyses) of bottom sediments of the lake located at altitude 31.2 m above sea level in the Mustatunturi ridge area (Kola region) was carried out. It has been established that the beginning of sedimentation in the lake basin occurred in the early Holocene under brackishwater conditions. The transition zone from marine to freshwater sediments were formed while the sea coastline has been retreating. Freshwater sediments were formed when the basin of the studied lake was disconnected from the sea.

Keywords: Diatoms, lake bottom sediments, granulometric analysis, Holocene, Kola region

For citation: Tolstobrova A.N., Tolstobrov D.S., Shikhirina K.A. Characteristics of environmental conditions during the accumulation of lake bottom sediments in the Mustatunturi ridge area (Kola region) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 779-784. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

1. Introduction

The study of lake bottom sediments on the Barents Sea coast of the Kola region was carried out as part of work to studies the sea-level change. Previously, such works was carried out in the areas of the Dalnie Zelentsy (Snyder et al., 1997), Nickel (Corner et al., 1999) and Polyarny (Corner et al., 2001), Teriberka (Kolka et al., 2023). This paper presents a new data on diatom analysis, geochronological and granulometric study of bottom sediments of a lake located at an altitude 31.2 m above sea level (a.s.l.) in the area of the Mustatunturi ridge.

2. Materials and methods

The materials were obtained during the field works in July 2021. The bottom sediment core was sampled with a peat corer; the thickness of the exposed bottom sediments was 180 cm. A lithological description, photographic documentation and sampling for various types of analyzes were carried out in the field. Determination of the age of sediments was carried out using samples of gyttja or silty gyttja at St. Petersburg State University according to standard methods (Arslanov, 1987). The resulting radiocarbon

dates were calibrated in OxCal 4.4.4 using the IntCal 20 calibration curve (Bronk Ramsey, 2020). The preparation of slides for diatom analysis was carried out according to standard methods (Diatomovyye..., 1974). The taxonomic identification of diatoms was refined according to the Algaebase database (Guiry and Guiry, 2022). Grain-size and LOI analyses was performed according to the standard methodology in the laboratory of Rational Environmental Management of the Department of Physical Geography and Environmental Management of the Faculty of Geography of Herzen University (Shikhirina et al., 2022).

3. Results and discussion

Three sedimentary facies were identified in the section of the bottom lake sediments at the fieldworks (Tolstobrov et al., 2023): facies I - marine sediments, represented by sand; facies II - transition zone from the sea to the lake, represented by sand with gyttja; facies III – freshwater lake sediments, which are represented by gyttja. The lithological description is shown in Figure 1.

Sediments of the marine facies are characterized by the lowest concentrations of diatoms (Fig. 1), which is typical for bottom lake sediments of the same genesis

*Corresponding author.

E-mail address: a.tolstobrova@ksc.ru (A.N. Tolstobrova)

Received: July 05, 2024; **Accepted:** August 19, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



on the Barents Sea coast (Tolstobrova et al., 2022). Both marine and freshwater species were identified in sediments of the marine facies (Fig. 1). The dominant species are the marine planktonic-benthic species *Paralia sulcata* and the freshwater-brackish water periphythic species *Staurosira subsalina*, *Staurosira* sp. Probably, this layer was formed when the coastline of the sea was close to the threshold from the lake, and the lake basin was a part of sea bay.

Based on the results of particle size distribution and organic matter content, the marine sediment facies is characterized by the largest average particle diameter and the lowest percentage of organic matter.

According to diatom analysis, an increase in the concentration of diatoms, a significant decrease in the percentage of marine species, and an increase in freshwater species were noted in the sediments of the transition zone (Fig. 1). The dominant complex still contains freshwater-brackish water periphythic species *Staurosira subsalina*, *Staurosira* sp., together with *Staurosira binodis*, and the content of *Paralia sulcata* is only a few percent. According to the LOI analysis of there is a gradual increase in organic matter up the section.

Marine and brackish-water species of diatoms disappear and the concentration of diatoms increases in sediments of the freshwater facies. The highest con-

centrations were observed in the lower part of freshwater sediments. This is probably due to peak values of *Fragilaria* sensu lato species, which is quite often observed for sediments of transition zones. The species diversity of diatoms increases up the section, which is reflected in the replacement of fragiliariod species with other various taxa. Periphythic species *Achnanthydium minutissimum*, *A. pusillum*, *Encyonopsis descripta*, *Eunotia arcus*, *Tabellaria flocculosa* and benthic species *Brachysira neoexilis*, *Frustulia saxonica* were identified as dominants and subdominants. Planktonic species account for the first percentages, which indicates that the lake water depth did not change during the middle and late Holocene.

The average particle diameter decreases in the granulometric composition of sediments at the freshwater stage, which corresponds to a calmer hydrodynamic conditions in the lake basin. In addition, according to lithological data, three mineragenic layers were identified in the sediments of facies III. According to the results of diatom analysis, its stood out in reducing the concentration of diatom valves, which is shown in Figure 1. According to grain-size analysis and organic matter content, the upper layer clearly stands out in the range of 135-136 cm: the average diameter increased from 10 to 50 μm , the proportion of organic matter content decreased from 40 to $\sim 5\%$. Above this layer,

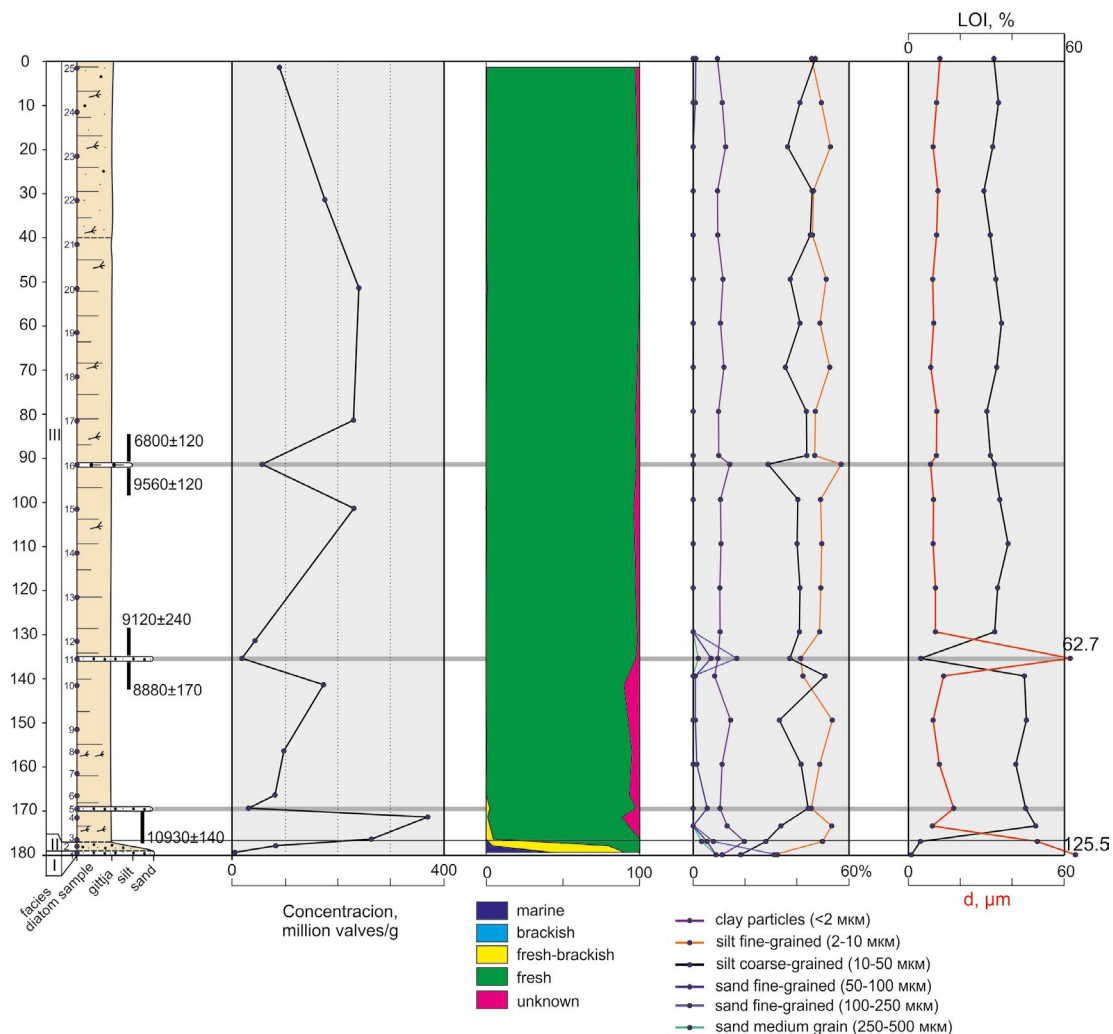


Fig.1. Results of a comprehensive study of bottom sediments of the lake located at altitude 31.2 m above sea level in the Mustatunturi ridge area (Kola region).

the content of organic matter decreased compared to the underlying sediments of the same facies, which, together with the gradually decreasing concentration of diatom valves, may indicate a decrease in the bio-productivity of the lake. Interlayers in the depth intervals of 169-170 cm and 91-92 cm, were reflected in a slight increase in particle size (Fig. 1) in addition to a decrease in the concentration of diatom valves.

4. Conclusion

The forming conditions of the bottom lake sediments in the Mustatunturi ridge area were reconstructed based on the new data obtained. It has been established that the beginning of sedimentation in the lake basin occurred in the early Holocene under brackishwater conditions. The transition zone from marine to freshwater sediments were formed while the sea coastline has been retreating. Freshwater sediments were formed when the basin of the studied lake was disconnected from the sea.

Acknowledgements

We are grateful to Nikolaeva S.B., Kostromina N.A., Pronina A.V., Korolev A.O., Komarov A.O., Staforkin A.A. for assistance in conducting field work. The work was carried out at the GI KSC RAS within the framework of the research topic FMEZ-2024-0007.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

Arslanov H.A. 1987. Radiouglerod: geokhimiya i geokhronologiya [Radiocarbon: geochemistry and geochronology]. Leningrad: Leningrad University Ed (in Russian)

Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.Ya. et al. 2001. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. *Global and Planetary Change* 31: 153–175

Corner G.D., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. et al. 1999. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. *Boreas* 28(1): 146-166. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x)

Diatomovyye vodorosli SSSR. Iskopayemyye i sovremennyye. Tom I [Diatoms of the USSR. Fossil and modern]. 1974. Vol. I. In: Proshkina-Lavrenko A.I. (Ed.). Leningrad: Nauka. (in Russian)

Guiry M.D., Guiry G.M. 2022. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Online resource]. URL: <http://www.algaebase.org>

Kolka V.V., Tolstobrov D.S., Corner G.D. et al. 2023. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change on the Barents Sea coast at Teriberka, Kola Peninsula, northwestern Russia. *The Holocene* 33(9): 1060-1072. DOI: [10.1177/09596836231176489](https://doi.org/10.1177/09596836231176489)

Shikhirina K.A., Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N. 2022. Barents Sea coastline dynamics in the Holocene in the Kola region: grain-size and LOI analyses of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1583-1585.

Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N., Shikhirina K.A. 2023. Preliminary data on changes in the Barents Sea level in the area of the Mustatunturi Ridge, northwest of the Murmansk region. *Proceedings of the Fersman scientific session of the GI KSC RAS* 20: 211–217. DOI: [10.31241/FNS.2023.20.026](https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.026) (in Russian)

Tolstobrova A.N., Tolstobrov D.S., Korsakova O.P. 2022. The late-glacial — Holocene stratigraphy of bottom sediments from small isolated lakes in the Barents Sea coast (Kola region). *Vestnik of Geosciences* 6 (330): 26–37. DOI: [10.19110/geov.2022.6.3](https://doi.org/10.19110/geov.2022.6.3) (in Russian)

Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N. et al. 1997. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas* 26: 329–346. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1997.tb00859.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1997.tb00859.x)

Bronk Ramsey C. 2024. OxCal 4.4 [Online resource]. URL: <http://c14.arch.ox.ac.uk> (request date: 14.01.2024)

Характеристика условий среды при накоплении донных отложений озера в районе хребта Мустатунтури (Кольский регион)



Толстоброва А.Н.^{1*}, Толстобров Д.С.¹, Шихирина К.А.²

¹ГИ КНЦ РАН, 184209 Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана 14

²РГПУ им. А.И. Герцена, 191186 Санкт-Петербург, наб. реки Мойки 48

АННОТАЦИЯ. Выполнено комплексное исследование (литологическое изучение, диатомовый анализ, радиоуглеродное датирование, гранулометрический анализ и анализ потерь при прокаливании (п.п.п.)) донных осадков безымянного озера с абсолютной отметкой 31.2 м над уровнем моря, расположенного в районе хребта Мустатунтури, Кольский регион. Установлено, что начало осадконакопления в котловине озера произошло в раннем голоцене при солонатоводных условиях. При последующем отступании береговой линии моря формировались переходные осадки от морских к пресноводным. После отсоединения котловины исследуемого озера от морского опресненного водоема, в ней стали формироваться пресноводные осадки.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, донные отложения озёр, гранулометрический анализ, голоцен, Кольский регион

Для цитирования: Толстоброва А.Н., Толстобров Д.С., Шихирина К.А. Характеристика условий среды при накоплении донных отложений озера в районе хребта Мустатунтури (Кольский регион) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 779-784. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-779

1. Введение

Изучение донных осадков озерных котловин на баренцевоморском побережье Кольского региона проводилось в рамках работ по изучению перемещения береговой линии моря. Ранее такие работы были выполнены в районах пос. Дальние Зеленцы (Snyder et al., 1997), г. Никель (Corner et al., 1999) и г. Полярный (Corner et al., 2001), пос. Териберка (Kolka et al., 2023). В данной работе представлены новые данные по диатомовому анализу, а также результаты геохронологического и гранулометрического изучения донных отложений озера, расположенного на абсолютной высоте 31.2 м над современным уровнем моря в районе хребта Мустатунтури.

2. Материалы и методы

Материалы были получены в ходе полевых работ в июле 2021 года. Керн донных осадков был отобран ручным буром, мощность керна составила 180 см. В полевых условиях были выполнены литологическое описание, фотодокументация и опробо-

вание на различные виды анализов. Определение возраста осадков выполнялось по образцам гиттии или алевритистой гиттии в Санкт-Петербургском государственном университете по стандартной методике (Арсланов, 1987). Полученные радиоуглеродные даты были откалиброваны в программе «OxCal 4.4.4» с использованием калибровочной кривой «IntCal 20» (Bronk Ramsey, 2020). Обработка проб на диатомовый анализ проводилась по стандартной методике (Диатомовые водоросли..., 1974). Таксономическая идентификация диатомовых водорослей уточнялась по базе данных Algaebase (Guiry and Guiry, 2022). Гранулометрический анализ и анализ потерь при прокаливании были выполнены в лаборатории рационального природопользования кафедры физической географии и природопользования на факультете географии Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена (Shikhirina et al., 2022).

3. Результаты и обсуждение

В разрезе изученной озерной котловины в полевых условиях были выделены три осадочные

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: a.tolstobrova@ksc.ru (А.Н. Толстоброва)

Поступила: 05 июля 2024; **Принята:** 19 августа 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



фашии (Толстобров и др., 2023): *фашия I* - морские осадки, представленные песком, *фашия II*, представленная песком с гиттией, формирование её происходило в переходных условиях от моря к озеру, *фашия III* – осадки пресноводного озера, которые представлены гиттией. Литологическое описание показано на рисунке 1.

Осадки морской фашии характеризуются самыми низкими концентрациями диатомей (Рис. 1), что характерно для донных отложений озер такого же генезиса баренцевоморского побережья (Толстоброва и др., 2022). В осадках морской фашии выделены как морские, так и пресноводные виды (Рис. 1). В качестве доминантов выступают морской планктонно-бентосный вид *Paralia sulcata* и пресноводно-солонатоводные виды обрастаний *Staurosira subsalina*, *Staurosira* sp. Вероятно, данный горизонт осадков формировался, когда береговая линия моря была близка к порогу стока из озера, а котловина представляла собой опресненный залив моря.

По результатам гранулометрического состава и содержания органического вещества фашия морских осадков характеризуются наибольшим средним диаметром частиц и наименьшим процентным содержанием органического вещества.

По данным диатомового анализа в осадках переходной зоны отмечено увеличение concentra-

ции диатомей, значительное уменьшение процентного содержания морских и увеличение пресноводных видов (Рис. 1). В доминирующем комплексе по-прежнему остаются пресноводно-солонатоводные виды обрастаний *Staurosira subsalina*, *Staurosira* sp., к ним присоединяется *Staurosira binodis*, а содержание *Paralia sulcata* составляет лишь первые проценты. По данным радиоуглеродного датирования накопление осадков переходной фашии от морских к пресноводным относится к раннеголоценовому времени. Согласно анализу п.п.п. происходит постепенное увеличение органического вещества вверх по разрезу.

В осадках пресноводной фашии происходит исчезновение морских и солонатоводных видов диатомовых водорослей и увеличение концентрации диатомей. Самые высокие значения концентрации отмечены в нижней части пресноводных осадков. Вероятно, это связано с пиковыми значениями видов *Fragilaria sensu lato*, что довольно часто отмечается для осадков переходных зон. Вверх по разрезу происходит увеличение видового разнообразия диатомовых водорослей, что отражается в смене фрагиляриидных видов на другие различные таксоны. В качестве доминантов и субдоминантов выделены виды обрастаний *Achnanthydium minutissimum*, *A. pusillum*, *Encyonopsis descripta*, *Eunotia arcus*, *Tabellaria flocculosa*, донные виды *Brachysira*

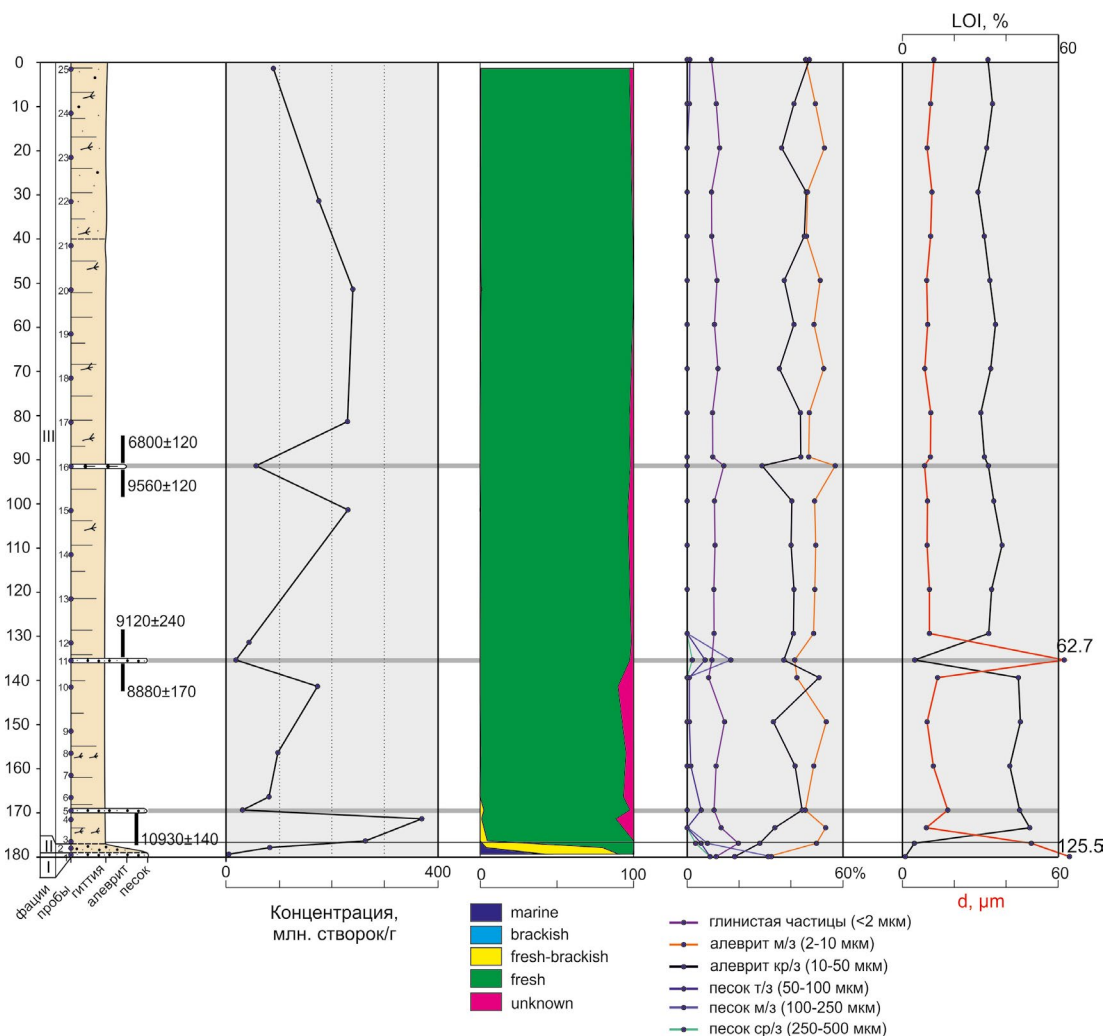


Рис.1. Результаты комплексного исследования донных отложений озера с абсолютной отметкой 31.2 м н.у.м. в районе хребта Мустунтури (Кольский регион).

neoxilis, *Frustulia saxonica*. Планктонные виды составляют первые проценты, что свидетельствует о том, что в течение среднего и позднего голоцена уровень водоёма практически не изменялся.

В гранулометрическом составе осадков пресноводной стадии происходит снижение значения среднего диаметра частиц, что соответствует более спокойному гидродинамическому режиму в водоёме. Кроме того, по литологическим данным в осадках фации III были выделены три минерогенных прослоя. По результатам диатомового анализа, они выделились в снижении концентрации диатомовых створок, что показано на рисунке 1. По гранулометрическому составу и содержанию органического вещества явно выделяется верхний прослой в интервале 135-136 см: средний диаметр увеличился с 10 до 50 мкм, доля содержания органического вещества снизилась с 40 до ~5 %. Выше этого прослоя содержание органического вещества снизилось по сравнению с нижележащими осадками этой же фации, что вместе с постепенно снижающейся концентрацией створок диатомовых водорослей может указывать на снижение биопродуктивности водоема. Прослой в интервалах глубин 169-170 см и 91-92 см помимо снижения концентрации створок диатомей нашли отражение в незначительном увеличении крупности частиц (Рис. 1).

4. Выводы

На основании полученных новых данных реконструированы условия формирования донных осадков озера в районе хребта Мустатунтури. Установлено, что начало осадконакопления соотносится с ранним голоценом, при этом в начале формирования отложений водоём был солоноватоводным. При последующем отступании береговой линии моря формировались переходные осадки от морских к пресноводным. После отсоединения котловины исследуемого озера от морского опресненного водоема, в ней стали формироваться пресноводные осадки.

Благодарности

Авторы благодарят Николаеву С.Б., Костромину Н.А., Пронину А.В., Королёву А.О., Комарова А.О., Стафоркина А.А. за помощь в проведении полевых работ. Работа выполнена в Геологическом институте КНЦ РАН по теме НИР FMEZ-2024-0007.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Арсланов Х.А. Радиоуглерод: геохимия и геохронология. 1987. Ленинград: Издательство Ленинградского университета.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Том I. 1974. Ленинград: Наука.
- Толстобров Д.С., Толстоброва А.Н., Шихирина К.А. 2023. Предварительные данные об изменении уровня Баренцева моря в районе хребта Мустатунтури, северо-запад Мурманской области. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН 20: 211–217. DOI: [10.31241/FNS.2023.20.026](https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.026)
- Толстоброва А.Н., Корсакова О.П., Толстобров Д.С. 2022. Позднеледниково-голоценовая стратиграфия донных отложений из котловин малых изолированных озер Баренцевоморского побережья (Кольский регион). Вестник геонаук 6(330): 26-37. DOI: [10.19110/geov.2022.6.3](https://doi.org/10.19110/geov.2022.6.3)
- Bronk Ramsey C. 2024. OxCal 4.4 [Online resource]. URL: <http://c14.arch.ox.ac.uk> (request date: 14.01.2024).
- Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.Ya. et al. 2001. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. *Global and Planetary Change* 31: 153–175
- Corner G.D., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. et al. 1999. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian-Russian border north of Nikel, northwest Russia. *Boreas* 28(1): 146-166. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1999.tb00211.x)
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2022. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway [Online resource]. URL: <http://www.algaebase.org>
- Kolka V.V., Tolstobrov D.S., Corner G.D. et al. 2023. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change on the Barents Sea coast at Teriberka, Kola Peninsula, northwestern Russia. *The Holocene* 33(9): 1060-1072. DOI: [10.1177/09596836231176489](https://doi.org/10.1177/09596836231176489)
- Shikhirina K.A., Tolstobrov D.S., Tolstobrova A.N. 2022. Barents Sea coastline dynamics in the Holocene in the Kola region: grain-size and LOI analyses of lake sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1583-1585.
- Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.N. et al. 1997. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia. *Boreas* 26: 329–346. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1997.tb00859.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1997.tb00859.x)