

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

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

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 керна 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 сопок - 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 эоловым 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 керна 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)