

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),

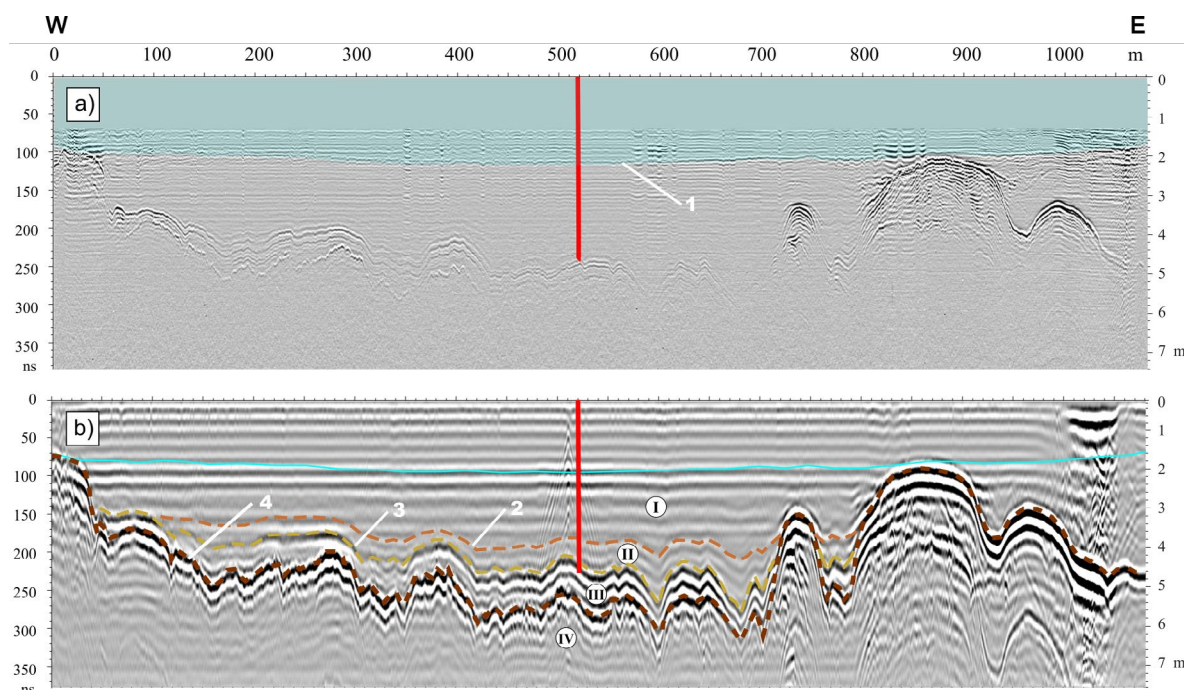


Fig.1. Radargrams along the profile 8, obtained in 2024 with: a) antenna unit AB-250 (250 MHz), b) antenna unit Triton (50 MHz). The place and depth of coring are marked with vertical red line. (1-4) – reflecting boundaries confining stratigraphic units (I-IV). I - gyttja (organic muds), II - layered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

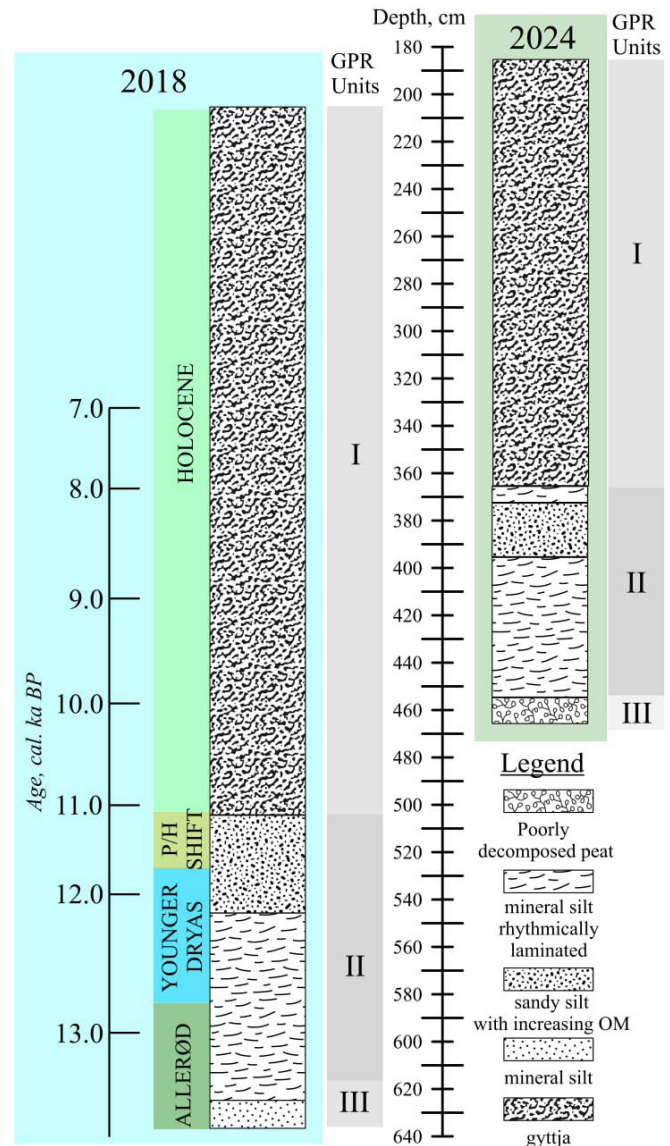


Fig.2. Lithology and chronostratigraphy of the Lake Khotavets sediments. Depth is accounted from ice surface.

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 палеоседиментации 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 продатирована (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: палеоседиментация, 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 палеоседиментации 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

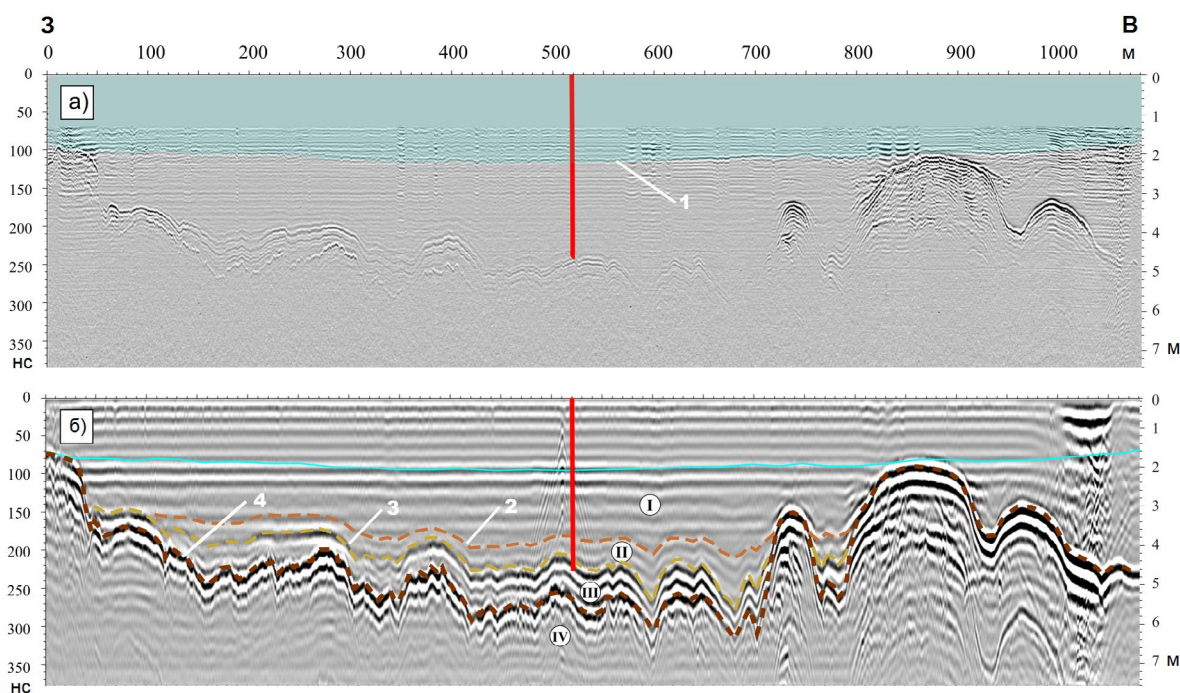


Рис.1. Радарограммы по профилю 8, полученные в 2024 г.: а) с антенным блоком АБ-250 (250 МГц), б) с антенным блоком Тритон (50 МГц). Место и глубина отбора колонки в 2024 г. отмечены вертикальной красной линией. (1-4) – отражающие границы между стратиграфическими подразделениями (I-IV). I – органический 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.

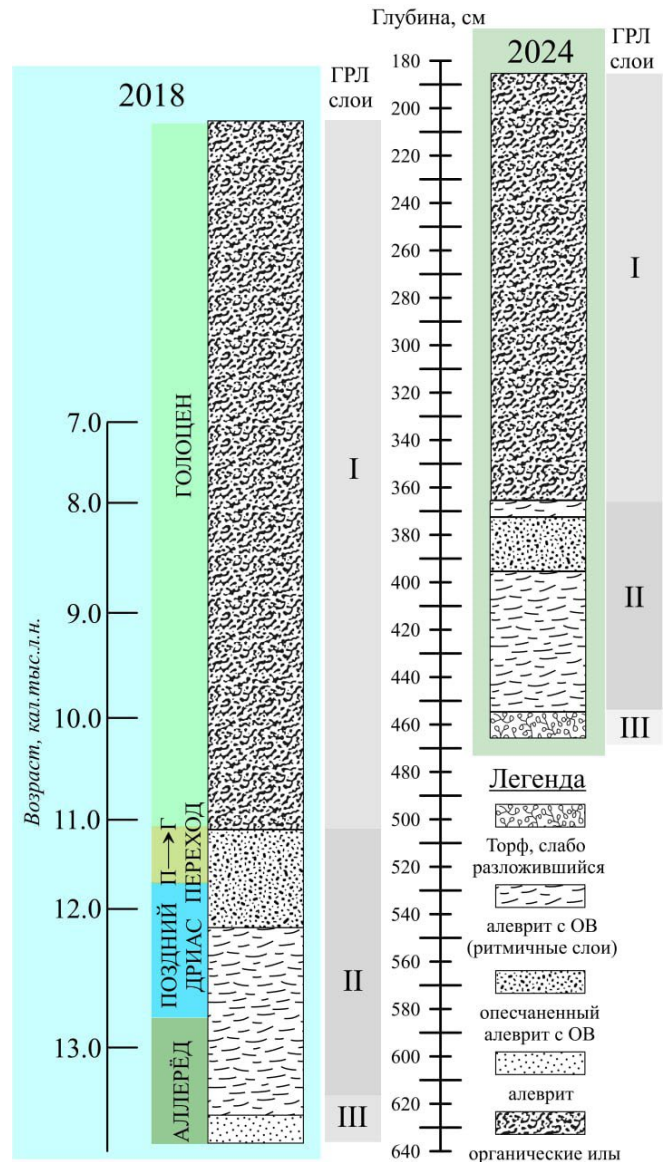


Рис.2. Литология и хроностратиграфия отложений озера Хотавец. «П → Г переход» - переходный горизонт от плейстоцена к голоцену. Глубина указана от поверхности льда.

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)