

# Evolution of Lake Ladoga as recorded in litho- and biostratigraphy of a small coastal lake

**Short communication**LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGYLudikova A.V.<sup>1\*</sup>, Kuznetsov D.D.<sup>1</sup>, Subetto D.A.<sup>2</sup>, Belkina N.A.<sup>3</sup><sup>1</sup>*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences – SPC RAS, Sevastyanova str. 9, St. Petersburg, 196105, Russia*<sup>2</sup>*Herzen State Pedagogical University of Russia, Moika River emb. 48, St. Petersburg, 191186, Russia*<sup>3</sup>*Northern 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](mailto: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.



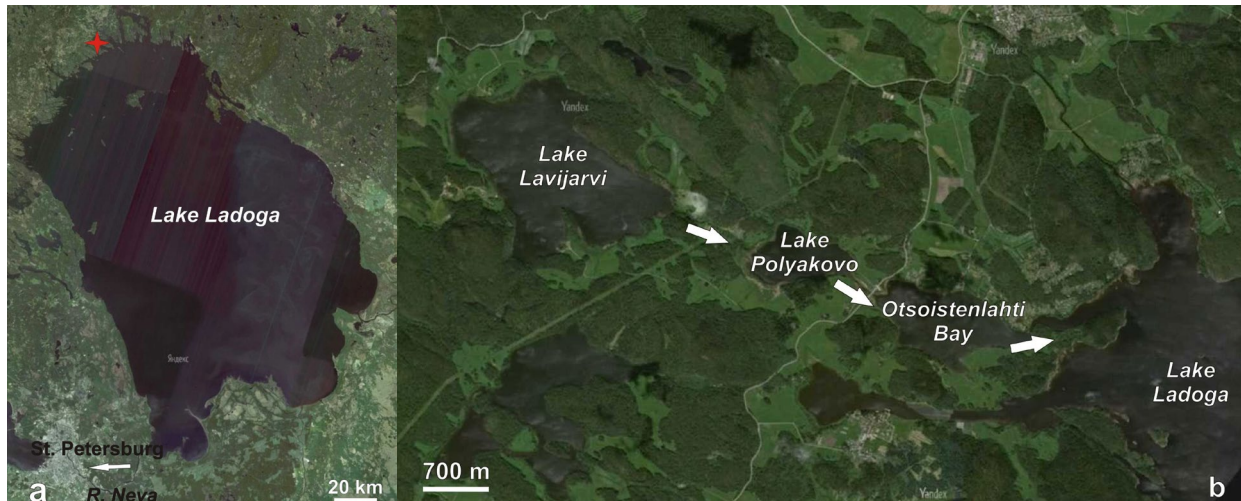


Fig. (a) – Lake Ladoga and Lake Lavijarvi (red star); (b) – a closer view of the location of Lake Lavijarvi.

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.<sup>1\*</sup>, Кузнецов Д.Д.<sup>1</sup>, Субетто Д.А.<sup>2</sup>, Белкина Н.А.<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт озероведения Российской академии наук – СПб ФИЦ РАН, ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия<sup>2</sup>Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, наб. реки Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия<sup>3</sup>Институт 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](https://doi.org/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 ( $S=2.2$  км<sup>2</sup>) 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](mailto: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 позднеледниковья, 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 РФФ (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: Микрорпалеонтология: фундаментальные проблемы и вклад в региональное геологическое изучение недр. Труды XVIII Всероссийского микрорпалеонтологического 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)