

# 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.<sup>1,2,3\*</sup>, Subetto D.A.<sup>3,1</sup>, Tokarev M.Ju.<sup>4</sup>, Repkina T.Yu.<sup>1,5</sup>, Zaretskaya N.E.<sup>1,5</sup>, Aksenov A.O.<sup>2</sup>, Belyaev P.Ju.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>FGBU 'VNIIOkeangeologiya', Angliyskiy pr., 1, Saint-Petersburg, 190121, Russia

<sup>2</sup>Institute of Earth Sciences SPBSU, 33-35, 10th line V.O. St.Petersburg, 199178, Russia

<sup>3</sup>Herzen State Pedagogical University of Russia, Emb. River Moika 48, Saint-Petersburg, 191186, Russia

<sup>4</sup>Moscow State University named after M.V. Lomonosov, 48, Lomonosov Moscow State University, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>5</sup>Institute 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](mailto: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.<sup>1,2,3\*</sup>, Субетто Д.А.<sup>1,3</sup>, Токарев М.Ю.<sup>4</sup>, Репкина Т.Ю.<sup>1,5</sup>,  
Зарецкая Н.Е.<sup>1,5</sup>, Аксёнов А.О.<sup>2</sup>, Беляев П.Ю.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Английский пр., д.1, 190121, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Институт наук о Земле СПбГУ, д.33-35, ул. 10-я линия В.О., 199178, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, д.48, набережная реки Мойки, 191186, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, д.1, Ленинские горы, 119991, Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт 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](mailto: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)