

Phosphate Minerals in the Bottom Sediments of Lake Onega from the Upper Neopleistocene to the Holocene

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Malov V.I.^{1,2*}, Strakhovenko V.D.^{1,2}, Subetto D.A.², Belkina N.A.^{2,3}

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (RAS), Prospekt Akademika Koptyga, 3, Novosibirsk, 630090, Russia

² Herzen State Pedagogical University of Russia, Naberezhnaya Moyki, 48, St. Petersburg, 191186, Russia

³ Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Alexandra Nevskogo, 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. This study investigates phosphorus-bearing minerals in the bottom sediments of Lake Onego and its proglacial precursor. The composition of phosphorus mineral phases differs in the Late Neopleistocene glaciolacustrine and Holocene lacustrine deposits. The former are dominated by fluorapatite, monazite, and xenotime, whereas the Holocene sediments, represented by fine-grained lacustrine muds, contain significant amounts of vivianite and Fe–Mn hydroxides. These differences revealed changes in phosphorus sources and conditions of its accumulation, which is important for assessing the trophic state of Lake Onega at all stages of its development under climatic and anthropogenic changes.

Keywords: Lake Onega, bottom sediments, phosphorus, minerals, vivianite

For citation: Malov V.I., Strakhovenko V.D., Subetto D.A., Belkina N.A. Phosphate Minerals in the Bottom Sediments of Lake Onega from the Upper Neopleistocene to the Holocene // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 362-375. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-362

1. Introduction

Phosphorus plays a key role in the biogeochemical cycles of aquatic ecosystems, regulating productivity and the degree of eutrophication in water bodies. Bottom sediments function as a sink and a source of phosphorus, particularly under changing redox conditions that affect the release of iron and phosphorus compounds. The mineral composition of sediments strongly influences phosphorus adsorption and desorption processes, thereby determining its bioavailability and participation in nutrient cycling (Hutchinson, 1957; Boström et al., 1982; Vasilieva, 1990; Ignatyeva, 2002; Belkina et al., 2006; Belkina, 2011; Belkina, 2015; Randall et al., 2017; Wu et al., 2021; Li et al., 2021).

This study aims to identify phosphorus-bearing minerals in the modern sediments of Lake Onego as well as in deposits formed during its proglacial development stage, in order to gain a better understanding of the processes governing phosphorus cycling in northern freshwater systems. The results obtained may serve as a basis for predicting changes in the trophic status of lake ecosystems under ongoing climatic and anthropogenic influences.

2. Materials and Methods

Lake Onego is the second-largest freshwater lake in Europe, surpassed only by Lake Ladoga. It is located within the drainage basin of the Baltic Sea, spanning the Republic of Karelia, as well as the Vologda and Leningrad regions of Russia. The geographic center of the lake lies at 62°42' N latitude and 33°25' E longitude. The lake is situated at an elevation of 33.3 meters above sea level. Its total area is 9970 km², 9720 km² of which is the water surface and 250 km² - over 1500 islands. The lake extends up to 248 km in the submeridional direction and reaches a maximum width of 96 km. The mean depth is 30 meters, with a maximum depth of 120 meters, and the total water volume is estimated at 295 km³. The lake's catchment area covers 53,100 km², and the shoreline stretches for approximately 1810 km. The mean water residence time is about 14 years (Subetto et al., 2022).

The water of Lake Onego is characterized by low mineralization (0.034–0.052 g/dm³), low electrical conductivity (average 54.85 µS/cm), high concentrations of dissolved oxygen (10.3–12.0 mg/dm³) with saturation ranging from 93.7% to 100.7%, and a slightly alkaline pH (7.3–8.2). Total phosphorus concentrations

*Corresponding author.

E-mail address: malov@igm.nsc.ru (V.I. Malov)

Received: May 26, 2025; **Accepted:** June 23, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



in the surface and bottom water layers generally correspond to oligotrophic and mesotrophic levels ($0.01\text{--}0.04\text{ mg/dm}^3$) (Sinyakova et al., 2023).

From a geological perspective, Lake Onego is located at the junction of two major geotectonic structures—the Fennoscandian Shield and the Russian Platform. The northern and central parts of the lake lie within the Karelian Archean Craton, composed predominantly of tonalite-trondhjemite gneisses, granites, and metamorphic rocks of the Archean and Paleoproterozoic age (up to 3.2 billion years old). The southern part of the basin is underlain by younger Vendian and Paleozoic sedimentary rocks, including limestones, sandstones, and clays (Subetto et al., 2022).

According to Subetto et al. (2020), the sedimentary sequence of Lake Onego consists of the following units (from bottom to top): (1) glacial and fluvioglacial deposits of the Late Pleistocene, composed of coarse sands with pebbles, clays with boulders, and boulder-rich loams; (2) Late Pleistocene glaciolacustrine deposits of the proglacial Lake Onego, represented by varved clays that gradually transite into homogeneous clays, overlying; (3) modern Holocene sediments (muds) of Lake Onego unconformably overlying these deposits.

Formation of the modern Lake Onego basin is associated with the retreat of the last glacial cover of the Valdai Glaciation. Around 14,000 years ago, the proglacial Lake Onego (PLO) emerged on the southern margin of the decaying glacier affected by nivation. This lake occupied a significantly larger area than the present-day lake. During the existence of the proglacial lake, glaciolacustrine, seasonally rhythmic varved clays, fluvioglacial sandy and gravel-pebble deposits accumulated. Modern lacustrine stage of Lake Onego began approximately 12,000–11,000 years ago and continues up to the present time. This stage is marked by humid sedimentation conditions, an increasing contribution of biogenic material to the formation of bottom sediments, and the predominance of autochthonous over allochthonous components in the composition of organo-mineral muds (Subetto et al., 2022).

Sediment sampling was conducted throughout the entire water area of Lake Onego from the R/V "Ecolog" using a Limnos corer (upper 50–100 cm), a GOIN TG-1 gravity tube (up to 1 m core length), and a 3 m long percussion gravity corer. Samples were collected from the following regions of Lake Onego: Povenetsky Bay, Zaonezhsky Bay, Small Onego, Lizhenskaya Bay, Unitskaya Bay, Kondopoga Bay, Petrozavodsk Bay, Big Onego, Central Onego, and South Onego (Fig. 1). The sediment cores were described and subsampled onboard the R/V "Ecolog." In addition, bottom sediment drilling was carried out in spring 2019 from lake ice in the Petrozavodsk Bay (Subetto et al., 2022) using a UWITEC percussion coring system (Austria). As a result, a unique 10 m long sedimentary sequence was obtained, encompassing the fluvioglacial, glaciolacustrine, and lacustrine development stages of Lake Onego (Subetto et al., 2020; Subetto et al., 2022).

Laboratory analyses were carried out at the Analytical Center for Multi-element and Isotopic Research of the Siberian Branch of the Russian

Academy of Sciences (SB RAS), (Novosibirsk, Russia). Morphology, phase composition, and chemical composition of bottom sediment samples were studied using a MIRA 3 TESCAN scanning electron microscope (Tescan, Czech Republic) equipped with an Oxford energy-dispersive spectrometer (Oxford Instruments, UK). The major elemental composition of the sediments (Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3) was determined by X-ray fluorescence analysis using an ARL-9900-XP spectrometer (Applied Research Laboratories, USA). Loss on ignition (LOI) was determined by gravimetric analysis.

Statistical data processing was performed using Microsoft Excel. Pearson's method was applied to calculate correlation coefficients between the major chemical components. The statistical significance of the correlations was assessed using the *t*-statistic, with critical *t*-values determined for a two-tailed test at a significance level of $\alpha = 0.05$.

3. Results and Discussion

Study of the vertical distribution of P_2O_5 in the bottom sediments of the Petrozavodsk Bay, Lake Onego, revealed that phosphorus is unevenly distributed and exhibits a pronounced increase upward from a depth of 175 cm, with a distinct peak at 55 cm (Fig. 2).

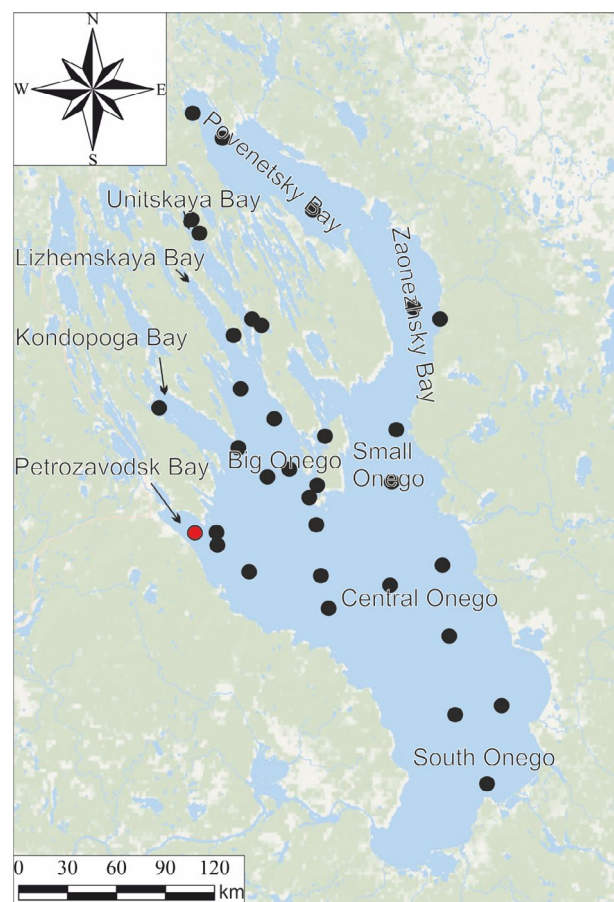


Fig.1. Sampling map of bottom sediments in Lake Onego. Legend: black circles — sediment cores collected from the R/V "Ecolog"; red circle — sedimentary sequence obtained by ice-based drilling in the Petrozavodsk Bay (Subetto et al., 2022).

Detailed investigation of the structure of bottom sediments across the entire area of Lake Onego has shown that P_2O_5 content in the glaciolacustrine deposits of the proglacial Lake Onego (varved clays) ranges from 0.04 wt% to 0.18 wt%, with an average of 0.14 wt%, which is lower than the P_2O_5 content in the Holocene sediments of Lake Onego. In the Holocene deposits, P_2O_5 concentrations range from 0.35 wt% to 2.9 wt%, with an average of 0.79 wt%. Notably, the highest phosphorus concentrations are found in the upper part of the Holocene sediments, where a mineralized layer forms at the boundary between the oxidized and reduced zones (Strakhovenko et al., 2023).

Phosphorus concentrations obtained for the bottom sediments of Lake Onego significantly exceed those reported on the sediments of Lake Baikal, where the average phosphorus content is approximately 0.11 wt% (Callender and Granina, 1997), as well as the concentrations observed in the bottom sediments of Lake Superior (USA), which range from 0.05 to 0.25 wt% (Li et al., 2018).

To identify the factors, influencing accumulation and distribution of phosphorus in the bottom sediments of Lake Onego, and to assess possible geochemical associations between elements, a correlation analysis was made. All samples were divided into two groups: Upper Pleistocene bottom sediments ($n = 31$) and Holocene bottom sediments ($n = 23$). The results are presented in Table 1.

Table 1. Matrices of pairwise correlation coefficients between major oxides in the Upper Pleistocene and Holocene bottom sediments of Lake Onego. Statistically significant negative and positive correlations are highlighted in blue and red, respectively.

Upper Pleistocene bottom sediments of the proglacial Lake Onego											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1										
TiO ₂	-0.95	1									
Al ₂ O ₃	-0.97	0.92	1								
Fe ₂ O ₃	-0.98	0.95	0.93	1							
MnO	-0.72	0.72	0.69	0.76	1						
MgO	-0.95	0.88	0.89	0.94	0.61	1					
CaO	-0.65	0.60	0.63	0.51	0.34	0.58	1				
Na ₂ O	-0.81	0.73	0.88	0.68	0.47	0.69	0.79	1			
K ₂ O	-0.97	0.92	0.93	0.96	0.78	0.93	0.60	0.73	1		
P ₂ O ₅	-0.90	0.92	0.93	0.88	0.77	0.77	0.56	0.80	0.85	1	
LOI	-0.90	0.91	0.81	0.93	0.73	0.89	0.52	0.55	0.92	0.78	1

Holocene sediments of Lake Onego											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1										
TiO ₂	0.83	1									
Al ₂ O ₃	0.88	0.93	1								
Fe ₂ O ₃	-0.90	-0.81	-0.82	1							
MnO	-0.69	-0.59	-0.60	0.38	1						
MgO	0.83	0.93	0.91	-0.81	-0.58	1					
CaO	0.16	0.55	0.32	-0.21	-0.21	0.49	1				
Na ₂ O	0.61	0.80	0.65	-0.58	-0.45	0.78	0.79	1			
K ₂ O	0.84	0.95	0.94	-0.80	-0.57	0.96	0.52	0.82	1		
P ₂ O ₅	-0.90	-0.85	-0.80	0.93	0.52	-0.81	-0.31	-0.65	-0.82	1	
LOI	-0.44	-0.38	-0.55	0.18	0.39	-0.42	0.03	-0.33	-0.52	0.16	1

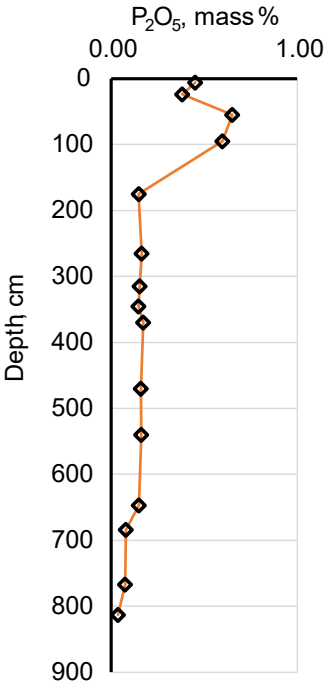


Fig.2. Vertical distribution of phosphorus in the bottom sediments of Petrozavodsk Bay, Lake Onego.

In the Upper Pleistocene deposits (varved clays), strong positive correlations are observed between P_2O_5 and all major elements, except silicon. The highest correlation coefficients for phosphorus are recorded with aluminum (0.93), titanium (0.92), iron (0.88), and potassium (0.85). The strong negative correlation of silicon with all other elements, including phosphorus, reflects varying quartz content across different horizons of the Upper Pleistocene deposits. At the same time, the close association of phosphorus with aluminum and potassium indicates a key role of clay minerals in the sorption and retention of phosphorus within the Upper Pleistocene varved clays. As demonstrated in numerous studies, clay minerals have sorptive capacity that allows for effective binding of phosphate ions (White and Zelazny, 1988; Wieland and Stumm, 1992; Colombo et al., 1994; Venema et al., 1998; Edzwald et al., 1976; Coppin et al., 2002; Sokolova and Trofimov, 2013; Gérard, 2016; Gorbunova et al., 2021; Li et al., 2021; Sosorova et al., 2023).

In contrast to the Upper Pleistocene deposits, most of the correlations between P_2O_5 and major elements in the Holocene sediments weaken or reverse sign, becoming negative—except for a very strong positive correlation with Fe_2O_3 ($r = 0.93$). This indicates a key role of iron in retention of phosphorus under modern sedimentary conditions. These findings are consistent with the previous research. For example, the role of iron hydroxides in phosphorus retention in the bottom sediments of Lake Onego was noted by Belkina (2015).

Scanning electron microscopy of the bottom sediments allowed identification of the main phosphorus-bearing mineral phases. In the glaciolacustrine deposits of the proglacial Lake Onego, principal phosphorus-bearing minerals are fluorapatite ($Ca_5(PO_4)_3F$), monazite ($((Ce, La, Nd, Th)PO_4)$), and xenotime (YPO_4) (Fig. 3). These minerals, along with other accessory phases, such as rutile, apatite, ilmenite, magnetite, titanite, zircon, monazite, xenotime, and hematite, are unevenly distributed within the bottom sediments of Lake Onego. Some accessory minerals are confined to specific bays and regions of the lake. For example,

xenotime was identified only in Velikaya Guba (Kizhi Archipelago). The likely source of xenotime is metasomatic rocks associated with uranium–vanadium deposits on the Zaonezhsky Peninsula (Padma, Kosmozero, Velikaya Guba, and Rudnaya Gorka deposits).

Despite the presence of phosphorus-bearing minerals in the Upper Pleistocene deposits of the proglacial Lake Onego, the results of correlation analysis, along with the uneven and source-specific distribution of phosphorus in discrete mineral phases, indicate that the majority of phosphorus in these sediments is not present as distinct mineral species, but rather occurs in a dispersed form associated with clay minerals.

In the Holocene sediments of Lake Onego, the main phosphorus-bearing phases are identified as vivianite ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) and Fe and Mn hydroxides. These findings are fully consistent with the results of the correlation analysis.

In Fe and Mn hydroxides, phosphorus is present in an adsorbed form (Fig. 4). These hydroxides possess a high specific surface area and active hydroxyl groups (OH^-), making them effective sorbents for phosphate. Sorption occurs through both ion exchange and the formation of inner- and outer-sphere complexes, as described in detail by Parfitt, Atkinson (1976) and Dzombak, Morel (1990). These processes play a key role in the retention of phosphorus in bottom sediments under oxic conditions.

Fe(III) hydroxides adsorb phosphate released during the mineralization of organic matter and, as sediments are progressively buried, undergo microbial and chemical reduction in the bottom sediments. In this way, they serve as a source of Fe^{2+} and orthophosphate required for the formation of vivianite ($Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$) (Melton et al., 2014).

In the bottom sediments of Lake Onego, vivianite occurs as discrete layers and nodules that are unevenly and irregularly distributed both within individual cores and between different cores (Fig. 5A).

The formation of vivianite in marine and lacustrine sediments as a stable mineral phase of phosphorus is a universal process observed across a variety of aquatic systems, including Lake Baikal, Lake Ladoga, Lake

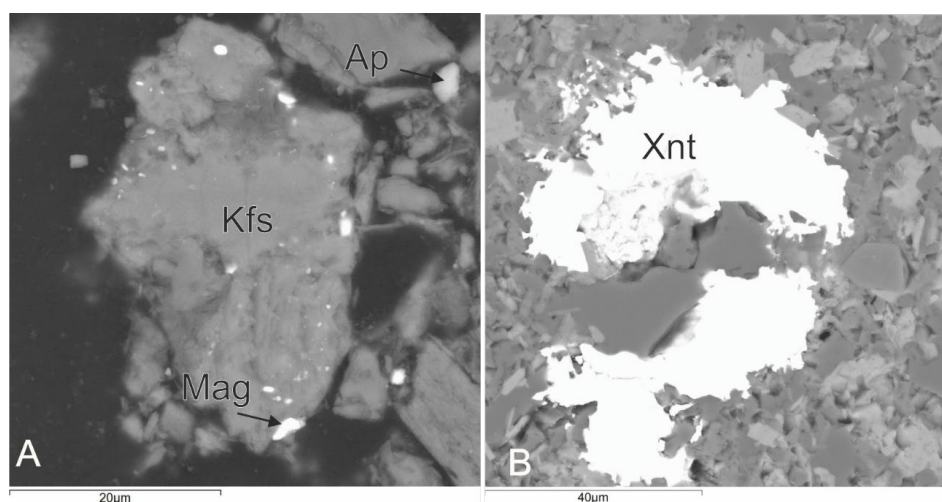


Fig.3. Phosphate minerals in the Upper Pleistocene bottom sediments of Lake Onego. (A) Apatite in the sediments of Maloje Onego; (B) Xenotime in the sediments of Velikaya Guba. Mineral abbreviations: Xtm – xenotime; Mag – magnetite; Kfs – K-feldspar; Ap – apatite.

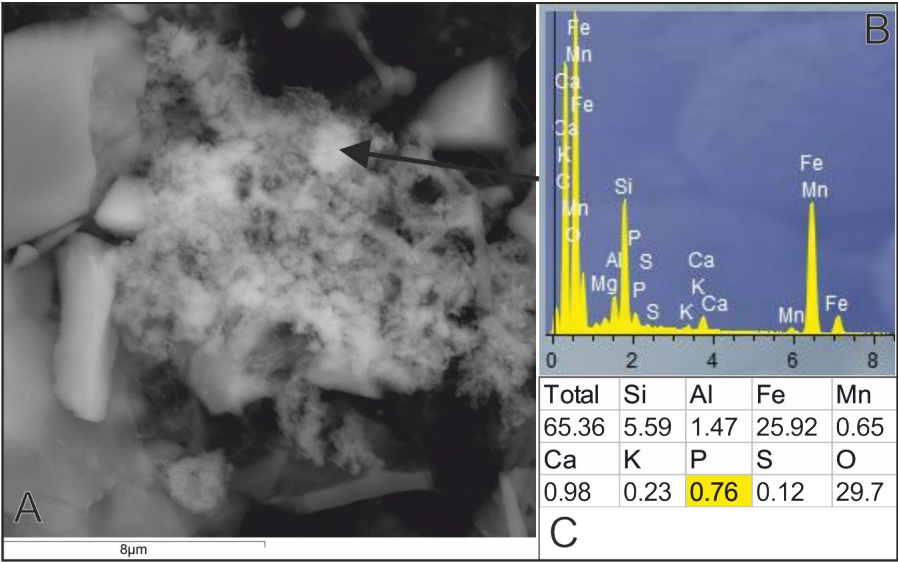


Fig.4. (A) Curdy precipitates of iron hydroxides; (B) EDS spectrum of iron hydroxides; (C) Elemental composition of iron hydroxides.

Superior (USA), the Baltic Sea, and others. Regardless of the trophic status of the water body, vivianite forms in sediment layers where reducing conditions prevail, and where sufficient concentrations of ferrous iron (Fe²⁺) and orthophosphate are present, alongside limited sulfate availability, as sulfate competes with phosphate for iron binding (Rothe et al., 2015; Liu et al., 2018; Barhdadi et al., 2024). In Lake Baikal, vivianite is found primarily in deep-water sediment zones with low sedimentation rates and low oxygen concentrations, where it plays a key role in phosphorus burial and stabilization of its sedimentary pool (Callender and Granina, 1997). In Lake Superior, despite higher oxygen concentrations in bottom sediments, vivianite can still form locally within microzones enriched in organic matter, where anaerobic conditions promote the reduction of Fe(III) and subsequent precipitation of Fe(II)-phosphates (Li et al., 2018).

Traces of fluorapatite, monazite, and xenotime were also identified (Fig. 5B), and—as in the Upper Pleistocene deposits—their occurrence is spatially limited and localized.

4. Conclusions

Phosphorus-bearing mineral forms in the bottom sediments of Lake Onego differ markedly between the Upper Pleistocene varved clays and the Holocene muds, reflecting a shift in the geochemical conditions of sediment accumulation and transformation. In the Upper Pleistocene glaciolacustrine deposits, phosphorus is primarily associated with stable accessory minerals such as fluorapatite, monazite, and xenotime, the presence of which is linked to external terrigenous input and local source rocks. However, the bulk of phosphorus occurs in a dispersed form adsorbed onto clay minerals as indicated by the results of the correlation analysis.

In the Holocene sediments, phosphorus is predominantly associated with iron-bearing compounds—primarily iron hydroxides and vivianite.

The observed differences in the mineral forms of phosphorus reflect significant shifts in sedimentation conditions, including changes in the redox regime, balance of terrigenous input, and intensity of biogeochemical processes.

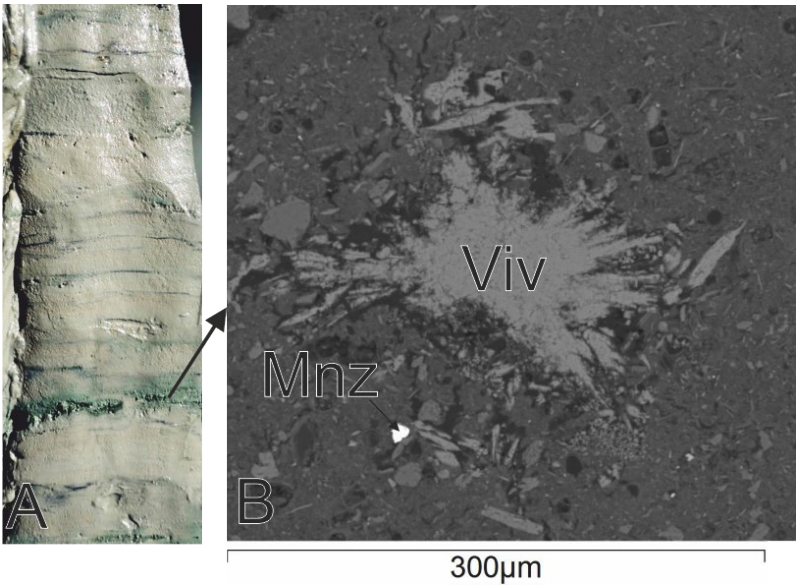


Fig.5. (A) Photograph of a core section from Holocene bottom sediments (muds) of Lake Onego; (B) Photograph of vivianite and monazite crystals.

Acknowledgements

The study was supported by the Russian Science Foundation (Project № 24-17-00206), <https://rscf.ru/project/24-17-00206/>.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Barhdadi M., Mouret A., Barras C. et al. 2024. Biogeochemical cycling of manganese and iron in a macrotidal and hyperturbid estuary subject to flow-driven sedimentation. *Chemical Geology* 661: 122182. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2024.122182](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122182)
- Belkina N.A. 2011. The role of bottom sediments in the transformation of organic matter and biogenic elements in lake ecosystems. *Vodnye problemy Severa i puti ikh resheniia*, Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN [Water Problems of the North and Ways of Their Solution, Proceedings of the Karelian Research Centre of the RAS] 4: 35–41. (in Russian)
- Belkina N.A. 2015. Phosphorus in the bottom sediments of Lake Onego. *Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gertsena* [Proceedings of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen] 173: 97–109. (in Russian)
- Belkina N.A., Sandman O., Ignatyeva N.V. 2006. Distribution of phosphorus forms in bottom sediments as an indicator of ecosystem eutrophication (case study of Lake Ladoga and Lake Onego). *Ekologicheskaya Khimiya* [Environmental chemistry] 15(3): 174–185. (in Russian)
- Boström B., Jansson M., Forsberg C. 1982. Phosphorus release from lake sediments. *Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie* 18: 5–59.
- Callender E., Granina L. 1997. Biogeochemical phosphorus mass Balance for Lake Baikal, southeastern Siberia, Russia. *Marine Geology* 139(1–4): 5–19. DOI: [10.1016/S0025-3227\(96\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00095-3)
- Colombo C., Barrón V., Torrent J. 1994. Phosphate adsorption and desorption in relation to morphology and crystal properties of synthetic hematites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(4): 1261–1269. DOI: [10.1016/0016-7037\(94\)90380-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90380-8)
- Coppin F., Berger G., Bauer A. et al. 2002. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology* 182(1): 57–68. DOI: [10.1016/S0009-2541\(01\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00283-2)
- Dzombak D.A., Morel F.M.M. 1990. Surface Complexation Modeling: Hydrous Ferric Oxide. New York: Wiley-Interscience.
- Edzwald J.K., Toensing D.C., Leung M.C.-Y. 1976. Phosphate adsorption reactions with clay minerals. *Environmental Science & Technology* 10(5): 485–490. DOI: [10.1021/es60116a001](https://doi.org/10.1021/es60116a001)
- Gérard F. 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—a myth revisited. *Geoderma* 262: 213–226. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.036](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036)
- Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Cherepukhina I.V. et al. 2021. Sorption processes in soils: Issues of study and the current state of the problem. *Sorption and Chromatographic Processes* 21(2): 265–275. DOI: [10.17308/sorpchrom.2021.21/3360](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360)
- Hutchinson G.E. 1957. The phosphorus cycle in lakes. In: Hutchinson G.E. (Ed.). *A Treatise on Limnology. Volume 1: Geography, Physics and Chemistry*. New York: Wiley.
- Ignatyeva N.V. 2002. The role of bottom sediments in the phosphorus cycle in lake ecosystems. In: Rumyantsev V.A., Drabkova V.G. (Ed.). *Lake Ladoga – Past, Present, Future*. St. Petersburg: Nauka. pp. 148–156. (in Russian)
- Li J., Zhang Y., Katsev S. 2018. Phosphorus recycling in deeply oxygenated sediments in Lake Superior controlled by organic matter mineralization. *Limnology and Oceanography* 63(3): 1372–1385. DOI: [10.1002/lno.10778](https://doi.org/10.1002/lno.10778)
- Li X., Huang L., Fang H. et al. 2021. Phosphorus adsorption by sediment considering mineral composition and environmental factors. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 4456–4467. DOI: [10.1007/s11356-020-12206-9](https://doi.org/10.1007/s11356-020-12206-9)
- Liu C., Gu X., Chen K. et al. 2018. Nitrogen and Phosphorus Exchanges Across the Sediment–Water Interface in a Bay of Lake Chaohu: Liu et al. *Water Environment Research* 90(11): 1956–1963. DOI: [10.2175/106143017X15131012188079](https://doi.org/10.2175/106143017X15131012188079)
- Melton E.D., Swanner E.D., Behrens S. et al. 2014. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle. *Nature Reviews Microbiology* 12(12): 797–808. DOI: [10.1038/nrmicro3347](https://doi.org/10.1038/nrmicro3347)
- Parfitt R.L., Atkinson R.J. 1976. Phosphate adsorption on goethite (α-FeOOH). *Nature* 264(5588): 740–742. DOI: [10.1038/264740a0](https://doi.org/10.1038/264740a0)
- Randall M., Carling G.T., Nelson S.T. et al. 2017. Characterizing the fate and mobility of phosphorus in Utah Lake sediments. Master of Science Thesis, Brigham Young University, Provo, USA.
- Rothe M., Kleeberg A., Grüneberg B. et al. 2015. Sedimentary Sulphur:Iron Ratio Indicates Vivianite Occurrence: A Study from Two Contrasting Freshwater Systems. *PLOS ONE* 10(11): e0143737. DOI: [10.1371/journal.pone.0143737](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143737)
- Sinyakova M.A., Krylova Yu.V., Ekimova S.B. et al. 2023. Hydrochemistry of Lake Onega based on 2022 research results. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University] 33(3): 581–589. (in Russian)
- Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. 2013. Sorptive properties of soils. Moscow State University. (in Russian)
- Sosorova S.B., Merkushova M.G., Boloneva L.N. et al. 2023. Sorption of phosphorus by saline soils of Western Transbaikalia. *Eurasian Soil Science* 56(10): 1227–1236. DOI: [10.31857/S0032180X22601414](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601414)
- Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Efremenko N.A. et al. 2023. The spatio-temporal distribution of elements in the bottom sediments of Lake Onego and small lakes located on the catchment area of Onego Ice Lake. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 68(4): 676–695. DOI: [10.21638/spbu07.2023.404](https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.404)
- Subetto D.A., Belkina N.A., Strakhovenko V.D. et al. 2022. In: Subetto D.A. (Ed.). *Paleolimnology of Lake Onego: from proglacial lake to modern conditions*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS. (in Russian)
- Subetto D.A., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. 2020. Structure of Late Pleistocene and Holocene sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia). *Minerals* 10(11): 964. DOI: [10.3390/min10110964](https://doi.org/10.3390/min10110964)
- Vasilieva E.P. 1990. Bottom sediments. In: Kaufman Z. S. (Ed.). *Ecosystem of Lake Onego and Trends in Its Change*. Leningrad: Nauka, pp. 147–175. (in Russian)
- Venema P., Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. 1998. Surface complexation modeling of Cd(II) sorption on goethite. *Journal of Colloid and Interface Science* 198(2): 282–295. DOI: [10.1006/jcis.1997.5288](https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5288)
- White G.N., Zelazny L.W. 1988. Surface characteristics of selected smectites. *Soil Science Society of America Journal* 52(1): 216–222. DOI: [10.2136/sssaj1988.03615995005200010038x](https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010038x)
- Wieland E., Stumm W. 1992. Adsorption of heavy metals on mineral surfaces: Fundamental concepts and models. In: Everett J. (Ed.) *Adsorption of Metals by Geomedia*. Academic Press, pp. 173–219.

Wu X., Ma T., Du Y. et al. 2021. Phosphorus cycling in freshwater lake sediments: Influence of seasonal water level fluctuations. *Science of The Total Environment* 775: 148383. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.148383](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383)

Минералы фосфора в донных отложениях Онежского озера от верхнего неоплейстоцена до голоцена



Малов В.И.^{1,2*}, Страховенко В.Д.^{1,2}, Субетто Д.А.², Белкина Н.А.^{2,3}

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

²Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, набережная реки Мойки, 48, Санкт-Петербург, 191186, Россия

³Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, проспект Александра Невского, 50, Петрозаводск, 185030, Россия

АННОТАЦИЯ. Исследование посвящено идентификации фосфорсодержащих минералов в донных отложениях Онежского озера и Онежского приледникового озера. Установлено, что набор минеральных фаз фосфора различаются между позднеплейстоценовыми озерно-ледниковыми и голоценовыми озерными отложениями. В озерно-ледниковых отложениях преобладают фторапатит, моноцит и ксенотим, тогда как в голоценовых озерных осадках (илах) значительную роль играют вивианит и гидроксиды железа и марганца. Выявленные различия указывают на изменение источников фосфора и условий его накопления, что важно для оценки трофического состояния Онежского озера на всех этапах его развития в условиях климатических и антропогенных изменений.

Ключевые слова: Онежское озеро, донные отложения, фосфор, минералы, вивианит

Для цитирования: Малов В.И., Страховенко В.Д., Субетто Д.А., Белкина Н.А. Минералы фосфора в донных отложениях Онежского озера от верхнего неоплейстоцена до голоцена // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 362-375. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-362

1. Введение

Фосфор играет ключевую роль в биогеохимических циклах водных экосистем, определяя продуктивность и степень эвтрофикации водоёмов. Донные отложения служат как накопителем фосфора, так и его источником, особенно при изменениях окислительно-восстановительных условий, влияющих на высвобождение соединений железа и фосфора. Минеральный состав осадков существенно влияет на процессы адсорбции и десорбции фосфора, что определяет его биодоступность и участие в круговороте (Hutchinson, 1957; Boström et al., 1982; Васильева, 1990; Игнатьева, 2002; Белкина и др., 2006; Белкина, 2011; Белкина, 2015; Randall et al., 2017; Wu et al., 2021; Li et al., 2021).

Данная работа направлена на идентификацию фосфорсодержащих минералов в современных осадках Онежского озера, а также в отложениях приледникового этапа развития озера, с целью лучшего понимания процессов, влияющих на круговорот фосфора в северных водоёмах. Полученные дан-

ные могут стать основой для прогноза изменений трофического состояния озерных экосистем в условиях климатических и антропогенных воздействий.

2. Объект, материалы и методы исследования

Объектом исследования являются донные отложения Онежского озера.

Онежское озеро — второй по величине пресноводный водоём Европы, уступающий лишь Ладожскому озеру. Оно расположено в пределах водосборного бассейна Балтийского моря, на территории Республики Карелия, Вологодской и Ленинградской областей. Географический центр озера находится на широте 62°42' с.ш. и долготы 33°25' в.д. Озеро расположено на высоте 33,3 м над уровнем моря. Площадь озера составляет 9970 км², из которых 9720 км² приходится на акваторию, а 250 км² — на более чем 1500 островов. Протяжённость озера в субмеридиональном

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: malov@igm.nsc.ru (V.I. Malov)

Поступила: 26 мая 2025; Принята: 23 июня 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



направлении достигает 248 км, ширина — до 96 км. Средняя глубина — 30 м, максимальная — 120 м, объём водной массы — 295 км³. Водосборный бассейн занимает территорию 53 100 км², а длина береговой линии достигает 1810 км. Период условного водообмена — около 14 лет (Субетто и др., 2022).

Вода Онежского озера характеризуется слабой минерализацией (0.034–0.052 г/дм³), низкой электропроводностью (в среднем 54.85 мкСм/см), высоким содержанием растворённого кислорода (10.3–12.0 мг/дм³) с насыщением 937–100.7 %, и слабощелочной реакцией среды (pH 7.3–8.2). Концентрации общего фосфора в поверхностных и придонных слоях воды в целом соответствуют олиготрофному и мезотрофному уровню (0.01–0.04 мг/дм³) (Синякова и др., 2023).

С точки зрения геологии Онежское озеро расположено на стыке двух геотектонических структур — Фенноскандинавского кристаллического щита и Русской платформы. Северная и центральная части озера лежат в пределах Карельского архейского кратона, сложенного тоналит-гранодиоритами, гнейсами, гранитами и метаморфическими породами архейского и палеопротерозойского возраста (до 3.2 млрд лет). Южная часть котловины представлена более молодыми осадочными породами венда и палеозоя (известняки, песчаники, глины) (Субетто и др., 2022).

В соответствии с исследованием (Subetto et al., 2020) дно Онежского озера слагают (снизу вверх): 1) ледниковые и флювиогляциальные отложения верхнего плейстоцена. Они состоят из крупного песка с галькой, глин с валунами и валунных суглинков; 2) выше находятся верхнеплейстоценовые лимногляциальные отложения Онежского приледникового озера, представленные ленточными глинами, которые постепенно переходят в гомогенные глины; 3) выше с несогласием залегают современные голоценовые отложения (илы) Онежского озера.

Формирование современной котловины Онежского озера связано с деградацией последнего ледникового покрова валдайского оледенения. Примерно 14 000 лет назад возникло Онежское приледниковое озеро (ОПО). Озеро сформировалось на южной периферии деградирующего ледника в условиях нивального климата и занимало значительно большую площадь, чем современное озеро. В условиях приледникового озера (ОПО) происходило накопление лимногляциальных сезонно-ритмичных ленточных глин и флювиогляциальных песчаных и гравийно-галечных отложений. Современный озерный этап развития Онежского озера берет начало с 12000–11000 лет тому назад и продолжается по настоящее время. Этот этап характеризуется гумидными условиями осадконакопления, возрастанием роли биогенного вещества в формировании донных отложений и преобладанием автохтонного вещества над аллохтонным в формировании органо-минеральных илов (Субетто и др., 2022).

Отбор образцов донных отложений производился на всей акватории Онежского озера с борта НИС «Эколог» с помощью пробоотборника «Limnos»

(верхние 50-100 см), трубки «ГОИН ТГ-1» (1 м керна) и ударной грунтовой трубки длиной 3 м. Отбор проб осуществлялся в следующих районах Онежского озера: Повенецкий залив, Заонежский залив, Малое Онего, Лижемская губа, Уницкая губа, Кондопожская губа, Петрозаводская губа, Большое Онего, Центральное Онего, Южное Онего (Рис. 1). Отобранные керны донных отложений описывались и разбирались на пробы непосредственно на НИС «Эколог». Помимо летних работ, было выполнено бурение донных отложений Онежского озера весной 2019 г. со льда в Петрозаводской губе (Субетто и др., 2022) с помощью ударно-канатной системы UWITEC (Австрия). В результате был получен уникальный разрез около 10 м донных отложений, охватывающий флювиогляциальный, лимногляциальный и лимнический этапы развития Онежского озера (Subetto et al., 2020; Субетто и др., 2022). Лабораторные работы выполнены в Аналитическом центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия. Для исследования морфологии, фазового и химического составов образцов донных отложений применялся сканирующий электронный микроскоп «MIRA 3 TESCAN» (Tescan, Чехия), оснащенный энергетическим спектрометром «Oxford» (Oxford Instruments, Великобритания). Для определения химического состава донных отложений (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃) использовался рентгеноспектральный флуоресцентный анализ на при-



Рис.1. Схема отбора проб донных отложений Онежского озера. Условные обозначения: черный кружок – керны, отобранные с борта НИС «Эколог»; красный кружок – разрез донных отложений, полученный бурением со льда в Петрозаводской губе (Субетто и др., 2022).

боре «ARL-9900-XP» (Applied Research Laboratories, США). ППП (потери при прокаливании) получены с помощью гравиметрического метода определения.

Статистическая обработка данных выполнена в программной среде Microsoft Excel. Коэффициенты корреляции между основными химическими компонентами были рассчитаны по методу Пирсона. Для оценки статистической значимости корреляций использовалась t-статистика, Критические значения t определялись для двустороннего критерия при уровне значимости $\alpha = 0.05$.

3. Результаты и обсуждение

Изучение вертикального распределения P2O5 в донных отложениях Петрозаводской губы Онежского озера позволило установить, что фосфор распределён неравномерно и резко увеличивается в верх по разрезу с глубины 175 см с ярко выраженным пиком на глубине 55 см (Рис. 2).

Детальное изучение строения донных отложений по всей акватории Онежского озера позволило установить, что содержание P₂O₅ в лимногляциальных отложениях Онежского приледникового озера (ленточные глины) варьирует в диапазоне от 0.04 масс. %, до 0.18 масс. %, со средним значением 0.14 масс. %, что ниже значений содержания

в голоценовых отложениях Онежского озера. Для голоценовых отложений определен диапазон значений концентрации P₂O₅ от 0.35 масс. %, до 2.9 масс. %, со средним значением 0.79 масс. %. Следует отметить, что максимальные значения концентраций фосфора характерны для верхней части голоценовых отложений, в которых наблюдается рудный слой, формирующийся на границе окисленного и восстановленного слоев (Strakhovenko et al., 2023).

Полученные значения концентраций фосфора в донных отложениях Онежского озера существенно превышает аналогичные значения для донных отложений озера Байкал, где среднее содержание фосфора составляет около 0.11 мас. % (Callender and Granina, 1997), или концентраций фосфора в донных отложениях озера Верхнее (США) (0.05-0.25 масс. %) (Li et al., 2018).

Для выявления факторов, влияющих на накопление и распределение фосфора в донных отложениях Онежского озера, а также для оценки возможных геохимических ассоциаций между элементами, была проведена корреляционная обработка полученных данных. Все данные были разделены на две группы: верхнеплейстоценовые донные отложения (количество проб = 31) и голоценовые донные отложения (количество проб = 23). Полученные результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Матрицы парных коэффициентов корреляции между основными оксидами в верхнеплейстоценовых и голоценовых донных отложениях Онежского озера. Синим и красным цветом выделены статистически значимые отрицательные и положительные коэффициенты корреляции соответственно.

Верхнеплейстоценовые донные отложения Онежского приледникового озера											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1										
TiO ₂	-0.95	1									
Al ₂ O ₃	-0.97	0.92	1								
Fe ₂ O ₃	-0.98	0.95	0.93	1							
MnO	-0.72	0.72	0.69	0.76	1						
MgO	-0.95	0.88	0.89	0.94	0.61	1					
CaO	-0.65	0.60	0.63	0.51	0.34	0.58	1				
Na ₂ O	-0.81	0.73	0.88	0.68	0.47	0.69	0.79	1			
K ₂ O	-0.97	0.92	0.93	0.96	0.78	0.93	0.60	0.73	1		
P ₂ O ₅	-0.90	0.92	0.93	0.88	0.77	0.77	0.56	0.80	0.85	1	
LOI	-0.90	0.91	0.81	0.93	0.73	0.89	0.52	0.55	0.92	0.78	1

Голоценовые отложения Онежского озера											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
SiO ₂	1										
TiO ₂	0.83	1									
Al ₂ O ₃	0.88	0.93	1								
Fe ₂ O ₃	-0.90	-0.81	-0.82	1							
MnO	-0.69	-0.59	-0.60	0.38	1						
MgO	0.83	0.93	0.91	-0.81	-0.58	1					
CaO	0.16	0.55	0.32	-0.21	-0.21	0.49	1				
Na ₂ O	0.61	0.80	0.65	-0.58	-0.45	0.78	0.79	1			
K ₂ O	0.84	0.95	0.94	-0.80	-0.57	0.96	0.52	0.82	1		
P ₂ O ₅	-0.90	-0.85	-0.80	0.93	0.52	-0.81	-0.31	-0.65	-0.82	1	
LOI	-0.44	-0.38	-0.55	0.18	0.39	-0.42	0.03	-0.33	-0.52	0.16	1

В верхнеплейстоценовых отложениях (ленточные глины) наблюдаются сильные положительные корреляции P_2O_5 со всеми элементами, кроме кремния. Наибольшие значения коэффициента корреляции фосфора наблюдаются с алюминием (0.93), титаном (0.92), железом (0.88) и калием (0.85). Сильная отрицательная корреляция кремния со всеми другими элементами, в том числе и с фосфором, является отражением вариации количества кварца в разных горизонтах верхнеплейстоценовых отложений. В то же время, тесная связь фосфора с алюминием и калием указывает на ключевую роль глинистых минералов в механизмах сорбции и удержания фосфора в верхнеплейстоценовых ленточных глинах. Как показано во многих исследованиях, глинистые минералы обладают сорбционной способностью, что позволяет эффективно связывать фосфат-ионы (White and Zelazny, 1988; Wieland and Stumm, 1992; Colombo et al., 1994; Venema et al., 1998; Edzwald et al., 1976; Coppin et al., 2002; Соколова и Трофимов, 2013; Gérard, 2016; Gorbunova et al., 2021; Li et al., 2021; Sosorova et al., 2023).

В отличие от верхнеплейстоценовых отложений, в голоценовых осадках большинство корреляционных связей P_2O_5 с основными элементами ослабевают или меняют знак на отрицательный, за исключением очень сильной положительной корреляции с Fe_2O_3 ($r = 0.93$). Это указывает на ключевую роль железа в удержании фосфора в условиях современных донных осадков. Полученные результаты согласуются с данными, полученными ранее. Например, о роли гидроксидов в удержании фосфора в донных отложениях Онежского озера отмечалось в работе Белкиной Н.А. (2015).

Изучение образцов донных отложений на сканирующем электронном микроскопе позволило определить основные фосфорсодержащие фазы. Для лимногляциальных отложений Онежского приледникового озера основными минералами фосфора являются фторапатит ($Ca_5(PO_4)_3F$), монацит ((Ce, La, Nd, Th) PO_4) и ксенотим ($Y(PO_4)$) (Рис. 3).

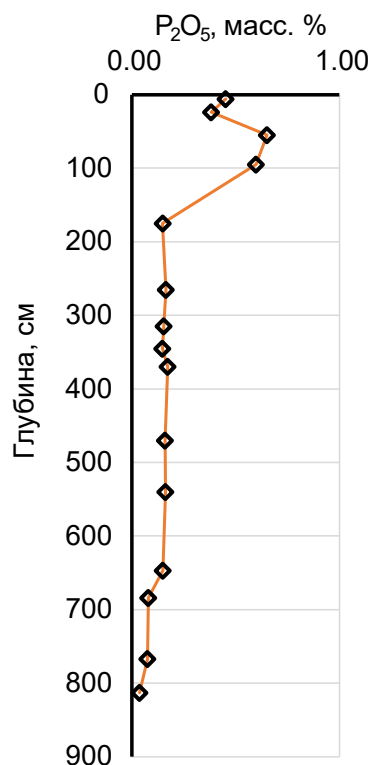


Рис.2. Вертикальное распределение фосфора в донных отложениях Петрозаводской губы Онежского озера.

Данные минералы, как и другие акцессорные минералы (рутил, апатит, ильменит, магнетит, титанит, циркон, монацит, ксенотим и гематит) распределены неравномерно в донных отложениях Онежского озера. Некоторые акцессорные минералы встречаются только в определенных заливах и районах Онежского озера. Например, ксенотим был определен лишь в губе Великая (Кижский архипелаг). Источником ксенотима, по всей видимости, могут являться метасоматиты уран-ванадиевых месторождений Заонежского полуострова (месторождения Падма, Космозеро, Великая губа, Рудная Горка).

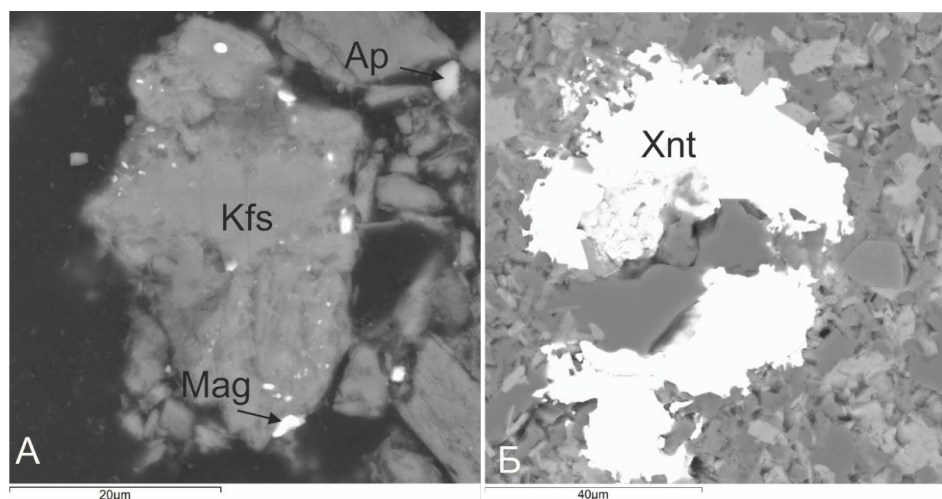


Рис.3. Минералы фосфора в верхнеплейстоценовых донных отложениях Онежского озера. А) апатит в донных отложениях Малого Онега. Б) ксенотим в донных отложениях губы Великая. Условные обозначения минералов: Xtm – ксенотим; Mag – магнетит; Kfs – K-полевого шпата; Ap – апатит.

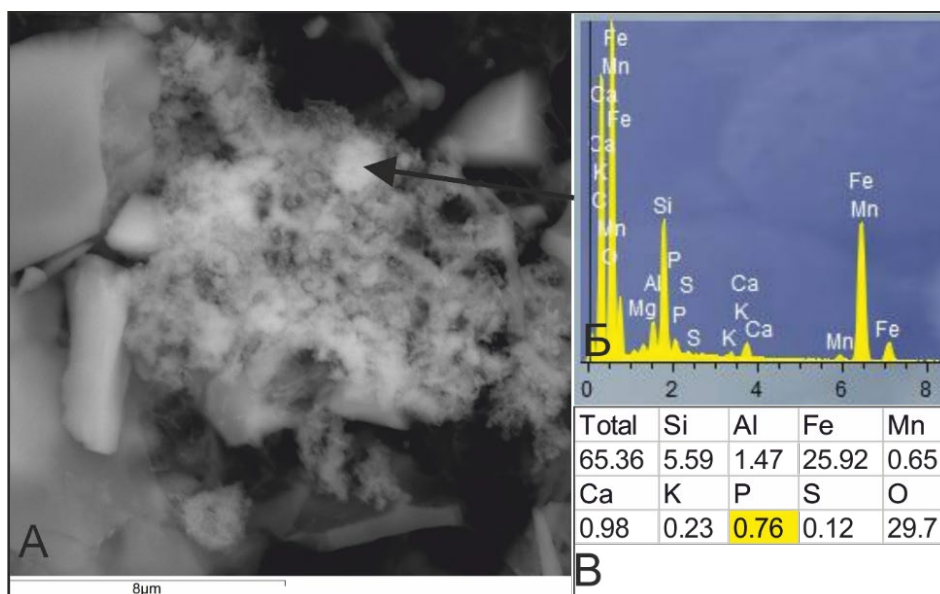


Рис.4. А) творожистые выделения гидроксидов железа; Б) спектр химического состава гидроксидов железа; В) химический состав гидроксидов железа.

Несмотря на присутствие фосфорсодержащих минералов в верхнеплейстоценовых отложениях Онежского приледникового озера, данные по корреляционному анализу, а также неравномерное и приуроченное к конкретным геологическим источникам локальное распределение самостоятельных минеральных фаз фосфора указывают на то, что основная часть фосфора в этих отложениях находится не в виде самостоятельных минералов, а в рассеянной форме, связанной с глинистыми минералами.

Для голоценовых отложений Онежского озера установлено, что основными фазами фосфора являются вивианит ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), а также гидроксиды Fe и Mn. Полученные результаты в полной мере согласуются с результатами корреляционного анализа.

В гидоксидах Fe и Mn фосфор находится в

сорбированном виде (Рис. 4). Эти гидроксиды обладают высокой удельной поверхностью и активными гидроксильными группами (OH⁻), что делает их эффективными сорбентами фосфатов. Сорбция происходит как за счёт ионного обмена, так и посредством образования внутренне- и внешнесферных комплексов, как это подробно описано в работах Parfitt, Atkinson (1976) и Dzombak, Morel (1990). Эти процессы играют ключевую роль в удержании фосфора в донных отложениях в окислительной обстановке.

Гидроксиды Fe (III) сорбируют высвобождающиеся в процессе минерализации органического вещества фосфаты, и по мере захоронения осадка, подвергаясь микробному и химическому восстановлению в донных отложениях, служат источником Fe^{2+} и ортофосфата, необходимых для формирования вивианита $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (Melton et al., 2014).

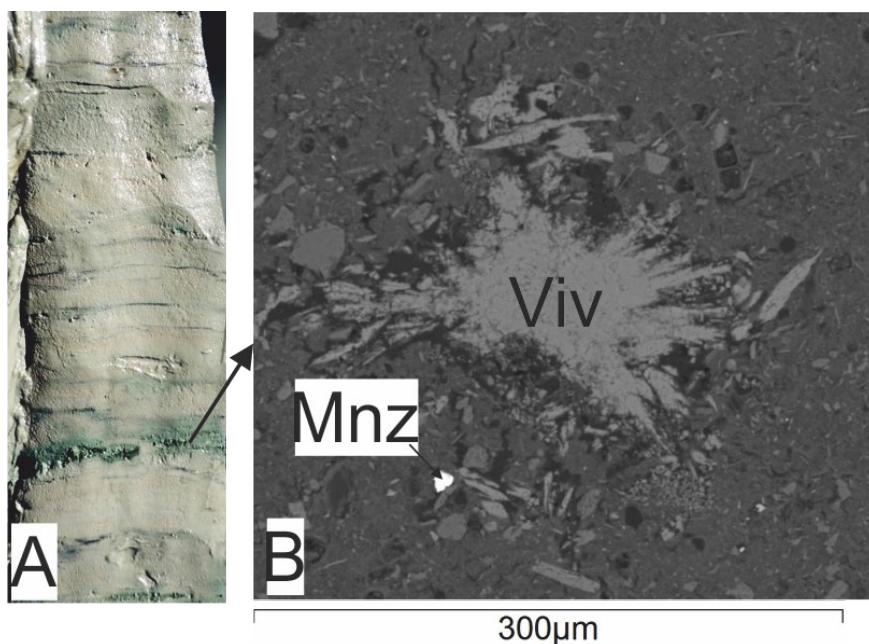


Рис.5. А) Фотография участка керна голоценовых донных отложений (илов) Онежского озера; В) Фотография кристаллов вивианита и монацита.

Вивианит в донных отложениях Онежского озера встречается в виде обособленных прослоев и стяжений, неравномерно и незакономерно распределенных как по керну, так и между отдельными кернами (Рис. 5 А).

Формирование вивианита в морских и озерных отложениях, как устойчивой минеральной формы фосфора, — это универсальный процесс, наблюдаемый в различных водных системах, включая оз. Байкал, Ладожское озеро, оз. Верхнее (США), Балтийское море и др. Независимо от трофического статуса водоёма, вивианит формируется в тех слоях донных отложений, где присутствуют восстановительные условия, достаточная концентрация двухвалентного железа (Fe^{2+}) и ортофосфата, а также ограничено поступление сульфатов, конкурирующих с фосфатами за ионы железа (Rothe et al., 2015; Liu et al., 2018; Barhdadi et al., 2024). В оз. Байкал вивианит обнаруживается в донных отложениях из преимущественно глубоководных районов озера с низкими скоростями седиментации и низкими концентрациями кислорода, где вивианит играет ключевую роль в захоронении фосфора и стабилизации его запасов в осадках (Callender and Granina, 1997). В оз. Верхнее, несмотря на более высокие концентрации кислорода в донных отложениях, вивианит может образовываться локально в микроразонах с накоплением органики, где создаются анаэробные условия, способствующие восстановлению Fe(III) и последующему осаждению Fe(II) -фосфатов (Li et al., 2018).

В следовых количествах встречены фторапатит, моноцит, ксенотим (Рис. 5В), который так же, как и в верхнеплейстоценовых отложениях, имеют локальный характер находок.

4. Выводы

Минеральные формы фосфора в донных отложениях Онежского озера значительно различаются между верхнеплейстоценовыми ленточными глинами и голоценовыми илами, что отражает смену геохимических условий накопления и трансформации осадков. В верхнеплейстоценовых лимногляциальных отложениях фосфор преимущественно ассоциирован с устойчивыми акцессорными минералами, такими как фторапатит, моноцит и ксенотим, присутствие которых связано с внешним терригенным поступлением и локальными источниками. При этом основная масса фосфора находится в рассеянной форме, сорбированной на глинистых минералах, на что указывают данные по корреляционному анализу.

В голоценовых отложениях фосфор в значительной степени связан с железосодержащими соединениями — в первую очередь с гидроксидами железа и вивианитом.

Установленные различия в минеральных формах фосфора демонстрируют важные сдвиги в условиях осадконакопления, включая изменение кислородного режима, баланса поступления терригенного материала и интенсивности биогеохимических процессов.

Благодарности

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Белкина Н.А. 2011. Роль донных отложений в трансформации органического вещества и биогенных элементов в экосистемах озёр. Водные проблемы Севера и пути их решения, Труды Карельского научного центра РАН 4: 35–41.
- Белкина Н.А. 2015. Фосфор в донных отложениях Онежского озера. Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена 173: 97–109.
- Белкина Н.А., Сэндман О., Игнатьева Н.В. 2006. Распределение форм фосфора в донных отложениях как индикатор эвтрофикации экосистемы (на примере Ладожского и Онежского озёр). Экологическая химия 15(3): 174–185.
- Васильева Е.П. 1990. Донные отложения. В: Кауфман З.С. (Ред.), Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Ленинград: Наука, С. 147–175.
- Игнатьева Н.В. 2002. Роль донных отложений в круговороте фосфора в экосистемах озёр. В: Румянцев В.А., Драбкова В.Г. (Ред.), Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, С. 148–156.
- Синякова М.А., Крылова Ю.В., Екимов С.Б. и др. 2023. Гидрохимия Онежского озера по результатам исследований 2022 года. Известия Байкальского государственного университета 33(3): 581–589.
- Соколова Т.А., Трофимов С.Я. 2013. Сорбционные свойства почв. Московский Государственный Университет.
- Субетто Д.А., Белкина Н.А., Страховенко В.Д. и др. 2022. В кн.: Субетто Д.А. (Ред.). Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.
- Barhdadi M., Mouret A., Barras C. et al. 2024. Biogeochemical cycling of manganese and iron in a macrotidal and hyperturbid estuary subject to flow-driven sedimentation. Chemical Geology 661: 122182. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2024.122182](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122182)
- Boström B., Jansson M., Forsberg C. 1982. Phosphorus release from lake sediments. Archiv für Hydrobiologie, Beihefte Ergebnisse der Limnologie 18: 5–59.
- Callender E., Granina L. 1997. Biogeochemical phosphorus mass Balance for Lake Baikal, southeastern Siberia, Russia. Marine Geology 139(1–4): 5–19. DOI: [10.1016/S0025-3227\(96\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(96)00095-3)
- Colombo C., Barrón V., Torrent J. 1994. Phosphate adsorption and desorption in relation to morphology and crystal properties of synthetic hematites. Geochimica et Cosmochimica Acta 58(4): 1261–1269. DOI: [10.1016/0016-7037\(94\)90380-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90380-8)
- Coppin F., Berger G., Bauer A. et al. 2002. Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. Chemical Geology 182(1): 57–68. DOI: [10.1016/S0009-2541\(01\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00283-2)
- Dzombak D.A., Morel F.M.M. 1990. Surface Complexation Modeling: Hydrous Ferric Oxide. New York: Wiley-Interscience.

Edzwald J.K., Toensing D.C., Leung M.C.-Y. 1976. Phosphate adsorption reactions with clay minerals. *Environmental Science & Technology* 10(5): 485–490. DOI: [10.1021/es60116a001](https://doi.org/10.1021/es60116a001)

Gérard F. 2016. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—a myth revisited. *Geoderma* 262: 213–226. DOI: [10.1016/j.geoderma.2015.08.036](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.036)

Gorbunova N.S., Gromovik A.I., Cherepukhina I.V. et al. 2021. Sorption processes in soils: Issues of study and the current state of the problem. *Sorption and Chromatographic Processes* 21(2): 265–275. DOI: [10.17308/sorpchrom.2021.21/3360](https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3360)

Hutchinson G.E. 1957. The phosphorus cycle in lakes. In: Hutchinson G.E. (Ed.), *A Treatise on Limnology*. Volume 1: Geography, Physics and Chemistry. New York: Wiley, pp. 727–752.

Li J., Zhang Y., Katsev S. 2018. Phosphorus recycling in deeply oxygenated sediments in Lake Superior controlled by organic matter mineralization. *Limnology and Oceanography* 63(3): 1372–1385. DOI: [10.1002/lno.10778](https://doi.org/10.1002/lno.10778)

Li X., Huang L., Fang H. et al. 2021. Phosphorus adsorption by sediment considering mineral composition and environmental factors. *Environmental Science and Pollution Research* 28: 4456–4467. DOI: [10.1007/s11356-020-12206-9](https://doi.org/10.1007/s11356-020-12206-9)

Liu C., Gu X., Chen K. et al. 2018. Nitrogen and Phosphorus Exchanges Across the Sediment–Water Interface in a Bay of Lake Chaohu: Liu et al. *Water Environment Research* 90(11): 1956–1963. DOI: [10.2175/106143017X15131012188079](https://doi.org/10.2175/106143017X15131012188079)

Melton E.D., Swanner E.D., Behrens S. et al. 2014. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle. *Nature Reviews Microbiology* 12(12): 797–808. DOI: [10.1038/nrmicro3347](https://doi.org/10.1038/nrmicro3347)

Parfitt R.L., Atkinson R.J. 1976. Phosphate adsorption on goethite (α -FeOOH). *Nature* 264(5588): 740–742. DOI: [10.1038/264740a0](https://doi.org/10.1038/264740a0)

Randall M., Carling G.T., Nelson S.T. et al. 2017. Characterizing the fate and mobility of phosphorus in Utah

Lake sediments. Master of Science Thesis, Brigham Young University, Provo, USA.

Rothe M., Kleeberg A., Grüneberg B. et al. 2015. Sedimentary Sulphur:Iron Ratio Indicates Vivianite Occurrence: A Study from Two Contrasting Freshwater Systems. *PLOS ONE* 10(11): e0143737. DOI: [10.1371/journal.pone.0143737](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143737)

Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Boloneva L.N. et al. 2023. Sorption of phosphorus by saline soils of Western Transbaikalia. *Eurasian Soil Science* 56(10): 1227–1236. DOI: [10.31857/S0032180X22601414](https://doi.org/10.31857/S0032180X22601414)

Strakhovenko V.D., Belkina N.A., Efremenko N.A. et al. 2023. The spatio-temporal distribution of elements in the bottom sediments of Lake Onego and small lakes located on the catchment area of Onego Ice Lake. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences* 68(4): 676–695. DOI: [10.21638/spbu07.2023.404](https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.404)

Subetto D.A., Rybalko A., Strakhovenko V. et al. 2020. Structure of Late Pleistocene and Holocene sediments in the Petrozavodsk Bay, Lake Onego (NW Russia). *Minerals* 10(11): 964. DOI: [10.3390/min10110964](https://doi.org/10.3390/min10110964)

Venema P., Hiemstra T., van Riemsdijk W.H. 1998. Surface complexation modeling of Cd(II) sorption on goethite. *Journal of Colloid and Interface Science* 198(2): 282–295. DOI: [10.1006/jcis.1997.5288](https://doi.org/10.1006/jcis.1997.5288)

White G.N., Zelazny L.W. 1988. Surface characteristics of selected smectites. *Soil Science Society of America Journal* 52(1): 216–222. DOI: [10.2136/sssaj1988.03615995005200010038x](https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010038x)

Wieland E., Stumm W. 1992. Adsorption of heavy metals on mineral surfaces: Fundamental concepts and models. In: Everett J. (Ed.), *Adsorption of Metals by Geomedia*. Academic Press, pp. 173–219.

Wu X., Ma T., Du Y. et al. 2021. Phosphorus cycling in freshwater lake sediments: Influence of seasonal water level fluctuations. *Science of The Total Environment* 775: 148383. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.148383](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148383)