

Original scientific paper

UDC 544.052.5(285)(470.23)
<https://doi.org/10.2298/GSGD2401183K>

Received: December 13, 2023

Corrected: February 10, 2024

Accepted: February 19, 2024

Sergej Komazec^{1*}

** University of Belgrade, Faculty of Geography, Belgrade, Serbia*

HOLOCENE AND POSTGLACIAL LAKE SEDIMENTATION IN THE CENTRAL PART OF THE KARELIAN ISTHMUS AS AN EXAMPLE OF LAKE KRASNOYE IN THE LENINGRAD REGION

Abstract: This paper deals with the issue of changing the conditions of the geographical environment in the postglacial and Holocene in the central part of the Karelian Isthmus. Toward paleogeographic reconstruction, a survey of the sediments of the bottom of Lake Krasnoye (Leningrad Oblast, Russian Federation) was conducted, since the lake deposits represent a reliable source of information about natural events from the past. A large amount of data obtained by X-ray fluorescence analysis of the core sample was analyzed, a lithostratigraphic description of the sediments was carried out and geophysical characteristics of the bottom sediments were interpreted. They were divided into several units that differed in the number of properties and reflected different sedimentation conditions. In the reconstruction of the past natural environment, special attention is paid to paleoclimatic and paleosedimentological issues.

Key words: quaternary, paleogeographic reconstruction, X-ray fluorescence analysis, paleosedimentology, geochemistry

¹ sergejkomazec@yandex.com (corresponding author)
Sergej Komazec (<https://orcid.org/0009-0005-5501-544X>)

Introduction

The territory of the Northwest Russia and the Karelian Isthmus represent an area of interest for the research of paleogeographic characteristics of the natural environment. It primarily refers to the processes of regional glaciation, deglaciation, lake formation and their development, as well as the emergence of the modern hydrographic network. All these processes were conditioned by the fluctuation of the climate, which was analogously reflected in the changes in the ecosystems and the landscapes as a whole. The investigation of the characteristics of the late Quaternary in the development of the planet Earth enables the monitoring of trends in the variability of the components of the natural environment.

The Karelian Isthmus was subjected to very dynamic natural processes in the Quaternary. Its specific geographical position between two large hydrological objects further strengthens the scientific interest in its research. For 70 years, Krasnoye lake has served as an object of study for hydrologists, biologists, chemists, ichthyologists, geologists, hydrophysicists, ecologists and geographers. The interest of biologists and ecologists in the lake and their research led to the inclusion of the lake in the list of protected natural monuments of the Leningrad Region. In addition, the interest in acquiring integral knowledge about the geographical and geological evolution of this territory still remains relevant for geological, hydrological and paleogeographic research.

The bottom of the lake represents one of the most important components of the lake ecosystem, while its sediments are the carriers of the most complete information about the history of the development of the aquatic environment in which they are deposited. They represent a kind of record of the most important processes - production-biological and physical-chemical, which took place during the entire history of the lake's existence (Kalesnik, 1967). Lake sediments formed over a long period are a reliable source of information about various events from the past and present. Climatic changes, catastrophic geological phenomena, anthropogenic impact on the environment are chronologically fixed in lake sediment cores. Apart from scientific importance, lake sediments have a great practical application as sources of raw materials for the economy (Shelehova et al., 2020).

The study of lake bottom sediments on the Karelian Isthmus for paleoreconstructions of the lake's history began in the 1960s (Subbeto, 2009). The focus of the work was on paleoclimatic issues, and paleolimnological reconstructions were limited by the imperfection of many of the methods used. The development of equipment and scientific methods made it possible to study lake bottom sediments at a higher level.

The Karelian Isthmus is the territory between the Baltic Sea in the west and Lake Ladoga in the east. It covers an area of approximately 15,000 km². From north to south, the length of the territory is 150-180 km, and from west to east 55-110 km. The relief is dominated by glacial forms such as moraine beds, oozes and ridges. The average altitude is up to 50 m, and the highest point is at an altitude of 203 m (Lembolovo Hills). Ridges of dunes and elevations (up to 40 m above sea level) stretch along the coast of the bay. The largest river of the Karelian Isthmus is the Vuoksi. In some places, the bed of this river widens, and the river water lakes up, thus forming the Vuoksi river-lake system. There are about 700 lakes on the isthmus. Many picturesque lakes (such as lakes: Otradnoye, Vuoksi, Shchuchye, Bolshoe Simaginskoe Lake, etc.) are interconnected by short lakes.

The entire area is located in the zone of boreal forests dominated by conifers (spruce, pine) and deciduous trees (birch, aspen).

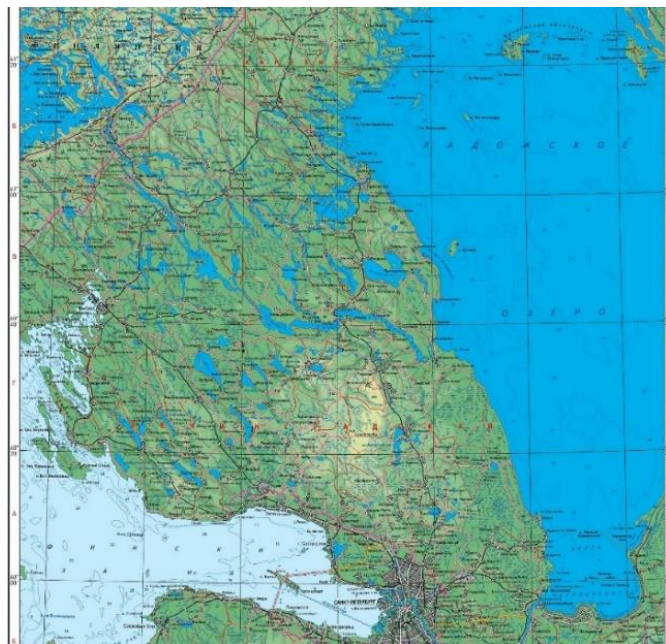


Fig. 1. Topographic map of the Karelian Isthmus
(Source: <https://geographyofrussia.com/wp-content/uploads/2014/12/138-139.jpg>)

Lake Krasnoye stretches along the northern slopes of the Lembozero Hills of the Karelian Isthmus on the abrasion-accumulative lake-glacial plain. The lake basin is a depression built from the rocks of the Baltic Shield, where its depth reaches 20 meters (Kuznetsov, Subbeto, 2019). Geological research around the lake established fluvioglacial deposits with a total thickness of 87.7 m, which lie on solid rocks represented by biotite gneiss and granite (Malasova, Sokolova, 1967). The northeastern shore of the lake is almost entirely sandy. It is overgrown with pine forest that is thinned out by meadows and pastures. In some parts, the coast is also made of gravel. The southern and southwestern coast, in the area from the mouth of the Stranica River to the place where the Krasnaya River flows out of the lake, is composed of large rocky blocks, and larger gravel is present near the water area of the lake (Kirillova, Raspopov 1971). The water system of Lake Krasnoye is part of the Vuoksi lake-river system that connects Saimaa and Ladoga. The area of the lake basin is 168 km² and is 18 times larger than the area of the lake itself. (Kondratyev, Bovyki, 2003). At the average multi-year water level in the lake, the surface of the water mirror is 9.13 km², while the maximum depth is 14.6 m, and the average is 6.6 m. The littoral zone extends to a depth of 2.0-2.5 m, stretches along a narrow strip and occupies 17.3% of the lake surface (Trifonova, 1988).

Many lakes in the Northwest Russia are characterized by the presence of accumulations of manganese nodules in their sediments. According to the distribution and reserves of these ores, Lake Krasnoye is one of the most representative. Ore deposits are mainly concentrated in the northwestern part of the lake. Compared to sedimentary rocks, manganese concretions are enriched in manganese oxides (26.7%) and iron (53.1%), while

they are poor in all other macroelements except phosphorus (Baturin, 2019). Lake Krasnoye has been a monitoring facility of the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences for several decades. The scientific-experimental limnological station on Lake Krasnoye was founded in 1949. It is used to conduct experimental and regional expeditionary research. Since 1964, systematic complex limnological research and experimental work on the study of the internal processes of the lake and the process of energy-material exchange in the lake basin-lake system have been carried out there.

Materials and methods

The subject of immediate research was the sediments of Lake Krasnoye. They were obtained in the process of drilling and sampling as part of the lake research in August 2020, which was led by Grigory Fyodorov, assistant professor of the geomorphology department of the Institute of Earth Sciences of St. Petersburg State University. Based on the data collected during the sampling procedure, the length of the obtained core was 23.8 meters, which represents a column of continuous sediments that can be conditionally divided into two parts. The lower part of the core was a complex of banded clays - varves, and the upper part was composed of mainly organic remains (sapropel). The core was scanned with a standard modular core scanner (Standard Multi-Sensor Core Logger - MSCL) GeoTek at the Institute of Oceanology P. P. Shirshov of the Russian Academy of Sciences in Moscow. The core sample was physically divided into two parts, one of which was control, and the other was the object of immediate research for lithostratigraphic description and sampling. In the work, the lithostratigraphic method was used, which is based on the study of the characteristics of the material composition of sediments, analysis of the macroscopic structure of sediments, texture, color, character of admixture, identification of basic and secondary components of sediments, etc. Based on these criteria, sediments are analyzed and compared. As part of the description, it was necessary to identify the sediments, determine their structure, which corresponded to the granulometric composition, properly measure their settling depth, and determine the presence of organic matter or other impurities.

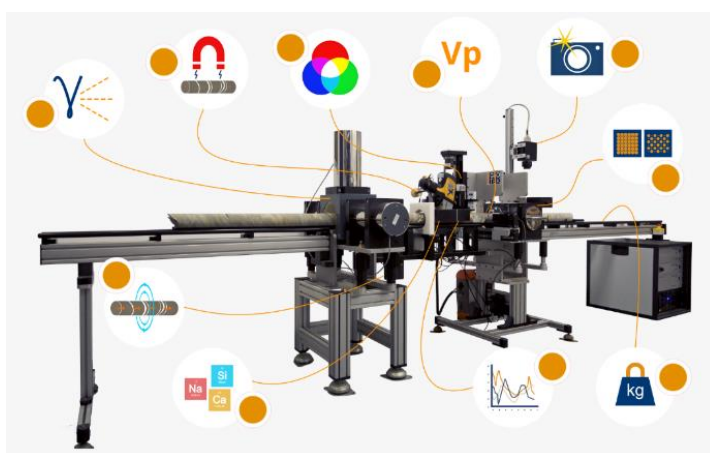


Fig. 2. GeoTek core logger (source: <https://www.geotek.co.uk/products/mscl-s/>)

The method of X-ray fluorescence analysis (XRF) is based on the dependence of the intensity of X-ray fluorescence on the concentration of the element in the sample. When the sample is irradiated with a strong flow of X-ray radiation, characteristic fluorescent radiation of atoms occurs, which is proportional to their concentration in the sample (Sobolev, 2014). In the study of environmental pollution, this analysis can provide information about the period of action of pollutants on sediment layers or information about the spatio-temporal extent of pollution, which is then checked by classical geochemical methods (Braden et al., 2019). A large amount of data on the chemical composition of the sediments was obtained by X-ray-fluorescence scanning of lake sediment cores, with precise measurements. The measurement procedure was performed with a distance of 1 mm, and the concentrations of chemical elements are presented in units of cps (counts per second). For research, the most representative chemical elements and ratios of elements that best represent sedimentation conditions in the past were selected. Before the graphical presentation of the distribution of chemical elements, the initial data were subjected to a data normalization procedure.

For a graphic presentation of the results of the vertical distribution of magnetic susceptibility and all the results of the geochemical analysis (these are Fe, K, Ca, Si, Ti, S, Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti, Si/Al, Ti/Zr, Fe/ Mn, Rb/Sr, K/Ti Ca/Ti, Zr/Rb) the OriginPro 2019 program was used. The Starter 3 program was used for the graphic image of the lithological column. Statistical and mathematical data analyses were performed in the Microsoft Excel program.

Results and Discussion

Lithostratigraphic composition of sediments

A detailed lithostratigraphic description of the core of the lake sediments identified 2 zones (Fig. 4). The upper zone (zone II) is represented by organic sediments that accumulated in the Holocene epoch, with a total thickness of 16.2 meters. At this depth, the mechanical composition of the sediments changes. Sapropel replaces clay and until the end of the studied core, the sediments are represented by clays (varves). It is zone I and is characterized by alternating layers of layered clays and layers of fine-grained sand. The sediments in zone II were formed by the extinction of living organisms of the lake during the last few thousand years and are quite homogeneous in their structure. With increasing depth, the sapropel becomes more layered, and more remains of material can be observed in the form of terrigenous particles of siltstone and psammite fraction are observed in it.

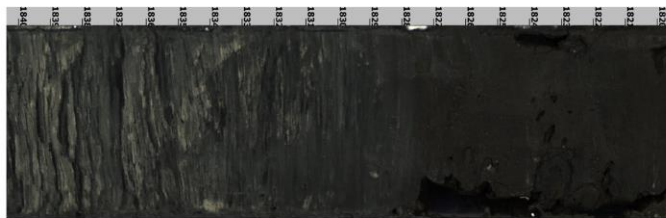


Fig. 3. Change in sedimentation conditions - transition of sapropel to clay sediments (author's archive)

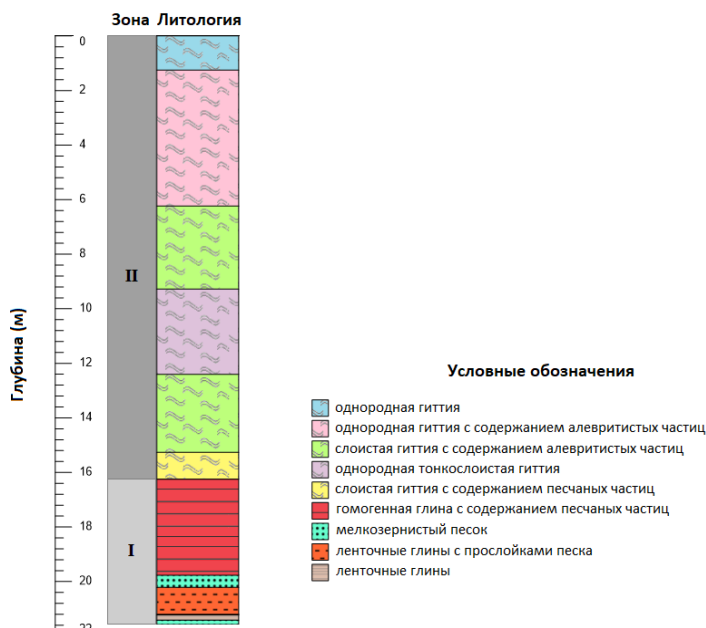


Fig. 4. Graphic representation of the lithostratigraphic column of lake sediments of Lake Krasnoye

The lower, postglacial part of the core sample, postglacial, tells about the events that happened after the deglaciation of the Karelian Isthmus and the liberation of the land from the ice cover. That is when the original lake was already formed thanks to the accumulation of clay in the winter period and fine-grained sand, of light shades, which the tributaries of the lake brought in the summer period. The total thickness of the sediments of zone I is 5.33 meters.

Physical characteristics of sediments

On the curve of the magnetic susceptibility indicator (Fig. 5), two parts can be distinguished, which differ in absolute value and dynamics of change. Up to a depth of about 15.8 m, the magnetic susceptibility values vary in a narrow range from 0 to 20×10^{-5} SI units, and then the tendency to increase this parameter continues until the end of the core, reaching maximum values at 19-20 meters, so that maximum values are observed in the lower part of the sediment column (up to 72.945×10^{-5} SI). After the maximum of 19.55 m, the magnetic susceptibility values have a decreasing trend, maintaining high values. At a depth of 20.5 m, the values increase again.

The upper part of the core sample with low values of magnetic susceptibility corresponds to zone II, which is dominated by organic sediments that are by their nature weakly magnetic and are part of the diamagnetic group. The change in the value of the magnetic susceptibility follows the change in the mechanical composition of the sediments and in zone I, which has rather high values. These indicators suggested that in this period the input of clastic material into the lake was maximal and actually indicates a high intensity of erosion and low bioproductivity of the lake.

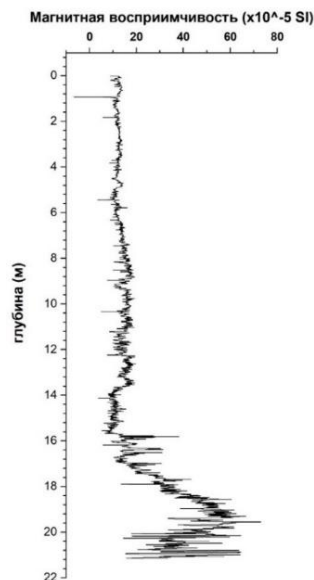


Fig. 5. Graph of changes in magnetic susceptibility

Analysis of geochemical properties of sediments

Based on the analysis of graphs of changes in the concentration of chemical elements, synchronous fluctuations in the content of lithophile elements such as iron, titanium, calcium, silicon and potassium are observed (Fig. 6). The upper part (lithological zone II) of the comparative graph, lithologically represented by organic mud, shows a constant synchronous change of a series of elements (Si, Ca, Fe), and the graphs of titanium and potassium behave similarly. That part of the graph is monotonous, without sharp fluctuations, but with noticeable variability and regularity of the distribution curve. For example, if we carefully analyze the distribution graphs of Si and Ca, a great similarity can be observed. The segments at depths of 5.53-7.47 m, 7.47-9.21 m and 10.28-12.38 m agree very well between elements mentioned above. Only the graph of iron differs by higher absolute values, compared to other elements, and by a decrease in values after reaching the maximum at 13.46 m. Graphs of individual elements ideally follow the most visible change in the lithological characteristics of the sediments, where organogenic sapropel changes to clays at a depth of 16.15/16.20 m. At such a depth, the curves of all elements show a sudden increase in values after a slight decrease at a depth of 16 meters.

A more pronounced dynamic of changes in the concentration of chemical elements is observed in the lower part of the lithostratigraphic column (lithological zone I). In the subzone I-g, the concentrations of elements gradually increase, but the highest values of the elements reach at the level of 17.65-19.45 meters, which is the subzone I-v in which all elements have maximum values (up to 6 times more than the average concentration in zone II). It is fairly evenly represented by high concentrations that follow the almost complete absence of any curve trend. In the middle of the subzone, more precisely at the depth of 18.40 m, a noticeable synchronous drop in values appears, but high concentration values are quickly re-established. Starting from a depth of 19.45 m, a decrease in values is observed, with absolute values slightly higher than in subzone I-g. Already at

20.20 m, high concentrations return, but only up to the twenty-first meter, where the values decrease until the end of the graph. The last segment represents subzone I.

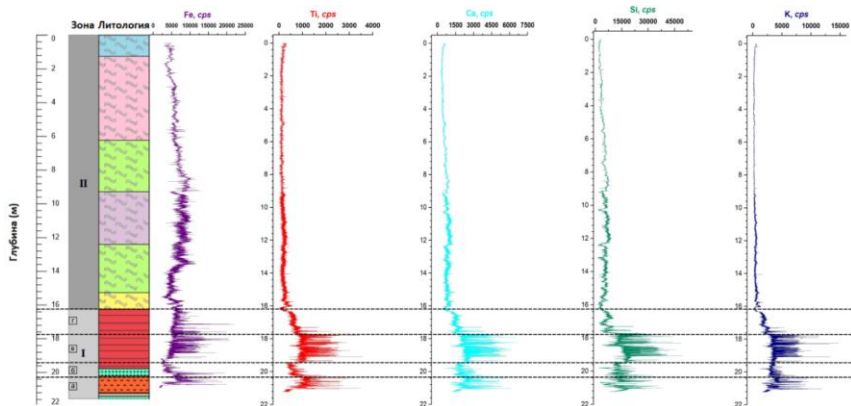


Fig. 6. Lithological structure and comparative graphs of the vertical distribution of the content of lithophile elements (Fe, Ti, Ca, Si, K)

Figure 7 shows graphs of vertical sulfur distribution and Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti ratios. These charts differ from both individual element charts and from each other, but certain repetitions are still observed. This applies to the Fe/Ti and Si/Ti charts and the S and Mn/Fe charts. The Fe/Ti and Si/Ti plots contain maximum values in the upper part of the plot up to a depth of approximately 9.2 meters. Within this segment there are a large number of peaks that are evenly distributed. One of the most significant peaks is at the level of 16.12 m on the border of the first and second zones. In zone I, the values are of low intensity with minimal concentrations to the depth of the core. The distribution of the Mn/Fe ratio sharply increases its values to a depth of 14.6 m, and then gradually decreases until the end of the lithostratigraphic column. The highest values are shown in the depth interval 9.26-16.1 m. The sulfur concentration graph shows a steady trend of increasing values up to 16.2 meters and then decreasing concentrations, which maintain the average values for this graph.

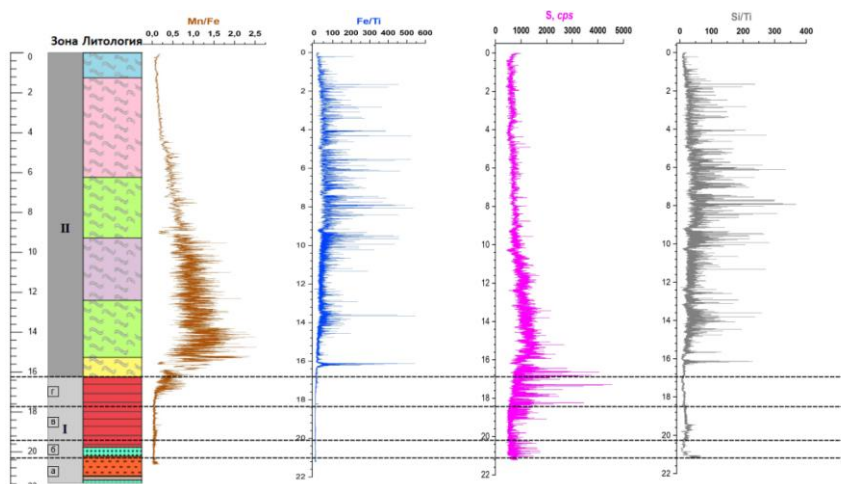


Fig. 7. Lithological structure and comparative graphs of the vertical distribution of the ratio and the content of lithophile elements (Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti) and S

Main stages and conditions of lake sedimentation

The dynamics of geochemical changes of fundamental lithophile elements divided the first zone into smaller segments, i.e. subzones (subzones I a-g). In zone I, there was the most intense input of clastic material into the lake, which is evidenced by the increase in the concentration of lithophile elements (Si, Ca, K, Ti), the results of magnetic susceptibility and lithological characteristics with the dominance of sandy and clayey sediments. Such indicators characterize the terrigenous type of sedimentation. Titanium is a relatively immobile element, present as a common component in various minerals (for example: rutile and titanomagnetite) and thus is usually associated with the input of eroded material (Wennrich et al., 2014).

In the periods corresponding to subzones I-a and I-v, maximum allogenic accumulation occurred and then mechanical water erosion dominated the land, and the climate was relatively cold. High Al/Ca values in these subzones are interpreted as periods of increased river runoff and correspond to a humid phase of the inland climate (Davies et al., 2015). Between these two periods, a dramatic decrease in the inorganic components of the sediments and a kind of stoppage of mineral accumulation shows the transition to more favorable and warmer climatic characteristics of the natural environment, with a low intensity of erosion in the basin.

The Ca/Ti graph shows the relative change of lithogenic and biogenic sedimentation. In the area of depths of 0-6.2 meters, many concentration peaks are observed, and the highest peak is at 16.2 m, where, according to lithological data, there is a change in biogenic and lithogenic sedimentation. The high intensity of the Ca/Fe ratio in subzones I-a, I-b and I-g, together with the dramatic decrease in Fe/Ca, indicates an influx of clastic material from the mainland. The uniform increase of Ti/Ca in that zone confirms such conclusions. The Mn/Fe ratio is used to estimate redox conditions (Peti & Augustinus, 2022). Higher Mn/Fe values are used to interpret higher oxygen presence since Mn is more easily reduced under anaerobic conditions than iron (Vyse et al., 2020). In the upper part of the graph, the parameter has a stable trend of increasing values. However, the first four meters of relatively low Mn/Fe values indicate worsening conditions for the organic world, i.e. an increase in the value of this indicator in the interval of 9-15 meters. Its maximum value at a depth of 14-16 meters can be characterized as a period of sedimentation with the most pronounced oxidation conditions in the lake, in the entire considered period. In this period, sapropel accumulated intensively while the bioproductivity of the lake was very high. In Zone I, consistently low and persistent Mn/Fe ratios indicate reducing conditions. Also, high sulfur values in this zone confirm such an assumption (Nesterov et al., 2019). In addition, in subzones I-a and I-g, the Fe/Mn ratio increases significantly and can testify to a decrease in sedimentation conditions. In a reducing environment, the solubility of Mn increases, but Mn is more susceptible to impacts (Boyle, 2001), so an increase in the Fe/Mn ratio may indicate the occurrence of anaerobic conditions. In the subzone I-g, the gradual increase of the Mn/Fe parameter indicates the gradual enrichment of the lake with oxygen and organic production. The increase in Mn/Fe values at a depth of 9-15 m can be attributed to water regression and lake surface reduction in the early Holocene (Sadokov, 2022).

The low value of the K/Ti indicator up to a depth of 10.2 m indicates a decrease in the physical input of material from the land and a decrease in clay deposits. And this part of the core is dominated by organic sediments dominate. In subzones I-g and

I-v, the value of the K/Ti ratio gradually increases, keeping relatively low values, which indicates an increase in the intensity of the accumulation of clayey sediments (Davies et al., 2015). In subzones I-a and I-b, this increase is even more pronounced, with a slight drop at 21 meters. In these subzones, the high values of the indicators confirm the deteriorating environmental conditions with pronounced physical decay of the rocks in cold climate conditions.

The Rb/Sr ratio can be used as an indicator of chemical erosion in the basin and thus indirectly as an indicator of cold and warm periods of climate development (Liu et al., 2020). Strontium enters the lake through surface runoff in the form of a free ion during chemical dissolution. Thus, the amount of strontium in lake sediments increases due to physical adsorption (organic matter) and/or chemical precipitation (carbonates) (Fernández et al., 2013). Strontium tends to be more mobile in warm and humid conditions. The vertical distribution of this ratio is quite stable, but there are certain fluctuations in zone I. In subzone I-g, the values maintain a high intensity as in the higher layers. Already in subzone I-v, there is a gradual decrease in value and a probable change in environmental conditions to a more favorable one. The low value of the Rb/Sr ratio in subzone I-b is associated with increased chemical erosion and indicates a period of development towards a warmer and wetter climate. In subzone I, the growth of this geochemical indicator can be observed, which may correspond to the cooling and aridization of the paleoclimate. The values of Si/Al and Zr/Rb ratios in zone II indicate favorable environmental conditions (Vyse et al., 2020). This is especially pronounced in the 4-5 m and 12.3-14.2 m depth intervals. The increase in the titanium content in the lower half of the graph and the sudden drop in the Zr/Rb results indicate a higher intake of fine-grained clastic material. The Ca/Ti ratio reflects the biogenic carbonate content (Davies et al., 2015). In fact, the Ca/Ti ratio as a whole can be considered to reflect biogenic productivity. On the graph, the peaks of this indicator predominate precisely in the part with organic sediments, with their frequency increasing in depths from 5 to 10 m. The formation of biogenic silica in zone II is indicated by high values of Si/Ti and Si/Al in the depth interval of 4-9 m and 13-15 m.

The organogenic regime dominated in the Holocene phase of sedimentation (zone II) and then powerful sapropel deposits accumulated. The lake production was intensive, the waters near the bottom were enriched with oxygen and provided the possibility of the development of lush vegetation. The climate was warm and humid, with not so strong dynamics. This is the period with reduced physical decomposition of rocks in the basin and cessation of sedimentation of clay deposits. Only the remains of extinct organisms were deposited. It is assumed that in the early Holocene the lake decreased its surface, which may be related to the period of the disappearance of the Baltic glacial lake and the formation of a lake with a smaller surface and shallower depths.

Zone I as a whole represents a postglacial and quite variable period in the process of lake sedimentation. At that time, the input of terrigenous material was dominated by the waters of melted glaciers, which actually indicates the mineral mode of sedimentation. The dynamics of fluctuations of geochemical indicators divided zone I into several independent units with different sedimentation conditions. In subzone I-g the climate was cold and clays accumulated. Similar conditions are observed in subzone I when the physical decay of rocks dominated, a large amount of terrigenous material flowed in at the expense of enhanced surface decay, and reducing conditions prevailed.

Tab. 1. Reconstruction of the paleogeographic environment based on the dynamics of geochemical indicators by lithostratigraphic units

Zone/subzone	Depth (m)	Geochemical indicators	Sedimentation mode	Sedimentation mode
I-a	20,20-21,57	High concentration of lithophile elements, decrease of Pb/Sr, increase of K/Ti and Fe/Mn	mineral	Increased mechanical erosion in the basin, cold and arid climate, reducing conditions
I-b	19,45-20,20	Decrease in the content of lithophile elements, low value of Rb/Sr	mineral	The intake of clastic material decreases, dominance of chemical erosion, warm and humid climate
I-v	17,65-19,45	Maximum values of lithophile elements, decrease of Rb/Sr, increase of K/Ti	mineral	Accumulation of clay sediments, the climate is moderate, the river flow and input of clastic material is increased

Conclusion

After the deglaciation, the territory of the Karelian Isthmus was subjected to dynamic natural processes, primarily hydrological. Seas and lakes were formed, water surface were connected and isolated, and the modern hydrological network was gradually formed. The palaeogeographical environment in the central part of the Karelian Isthmus was reconstructed on the example of studying the bottom of Lake Krasnoye. Lithostratigraphic and geochemical data showed two types of sedimentation regimes - organogenic Holocene and mineral postglacial. The high density of organic sediments indicates a favorable climate and good conditions for the development of living beings in the lake. The postglacial part is represented by powerful clayey sediments. Based on the geochemical analysis, rather variable results were obtained that showed a variety of postglacial conditions related to paleoclimate and paleosedimentation. There was an alternating period with a warmer climate and the dominance of chemical erosion and a period with colder environmental conditions and increased input of terrigenous material.

In this paper, very precise geophysical and geochemical methods were used with high reliability of the obtained data. For the first time, in the study of Lake Krasnoye, such a modern approach was applied to study the reconstruction of paleogeographic conditions. The research showed that the state of natural components in the geological past and their variability over time can be reliably interpreted by geochemical methods, that is, by studying the concentration of chemical elements and their relationships in sediments. The methodology applied in the paper could represent the basis for further studies of lake

sediments in the territory of the Northwest Russia, given that modern instruments have enabled a detailed, exact and reliable analysis of core sediments, and therefore a better and more precise interpretation of the obtained results.

However, in addition to the results of this work, for a comprehensive investigation of environmental conditions in the past, it is necessary to include a whole range of paleogeographical methods. First, biostratigraphic methods (diatom analysis, palynological analysis), dating methods and methods for obtaining data on organic carbon and nitrogen.

Conflicts of Interest: The author declares no conflict of interest.

Publisher's Note: Serbian Geographical Society stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

© 2024 Serbian Geographical Society, Belgrade, Serbia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Serbia.

References

- Акрамов, З. М., Калесник, С. В., & Мысль, М. (1967). Узбекистан. In: С. В. Калесник (Ed.), *Советский Союз: географическое описание* (pp. 318). [Akramov, Z. M., Kalesnik, S. V., & Mysl, M. (1967). Uzbekistan. In: S. V. Kalesnik (Ed.), *Sovetskij Sojuz: geografičeskoe opisanie* (pp. 318)].
- Baturin, G. N. (2019). Distribution of Elements in Ferromanganese Nodules in Seas and Lakes. *Lithology and Mineral Resources*, 54(5), 362–373. <https://doi.org/10.1134/S002449021905002X>
- Boyle, J. F. (2001). Inorganic geochemical methods in palaeolimnology. Developments in paleoenvironmental research. In: W. M. Last & J. P. Smol (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments* (pp. 83–141). Kluwer Academic Publishers.
- Braden, G., Patterson T., Reinhardt, E., Galloway, J., & Roe H. (2019). An evaluation of methodologies for calibrating Itrax X-ray fluorescence counts with ICP-MS concentration data for discrete sediment samples. *Chemical Geology*, 521, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.05.008>
- Davies, S. J., Lamb, H. F., & Roberts, S. J. (2015). Micro-XRF core scanning in palaeolimnology: recent developments. In: I. W. Croudace & R. G. Rothwell (Eds.), *Micro-XRF studies of sediment cores: applications of a non-destructive tool for the environmental sciences* (pp. 189–226). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_7
- Fernández, M., Björck, S., & Wohlfarth, B. (2013). Diatom assemblage changes in lacustrine sediments from Isla de los Estados, southernmost South America, in response to shifts in the southwesterly wind belt during the last deglaciation. *Journal of Paleolimnology*, 50(4), 433–446. <http://dx.doi.org/10.1007/s10933-013-9736-4>
- Кириллова, В. А., & Распопов, И. М. (1971). *Озера Ленинградской области*. Лениздат [Kirillova V. A. & Raspopov I. M. (1971). *Ozera Leningradskoj oblasti*. Lenizdat].

- Кондратьев, С. А., & Бовыкин, И. В. (2003). Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор — озеро. *Журнал Метеорология и гидрология* [Kondratev, S. A., & Bovyki, I. V. (2003). Vlijanie vozmožnyh klimatičeskikh izmenenij na gidrologičeskij režim sistemy vodosbor — ozero. *Žurnal Meteorologija i gidrologija*].
- Кузнецов, Д. Д., & Субетто, Д. А. (2019). *Стратиграфия донных отложений озер Карельского перешейка*. ГЕОС [Kuznetsov, D. D., & Subetto, D. A. (2019). *Stratigrafija donnyh otloženij ozer Karel'skogo perešejka*. GEOS].
- Liu, L., Jiang, G., Mao, X., Zhao, H., Zhao, Y., Li, Y., Zhao, H., & Bi, Z. (2022). Geochemical Composition of Surface Sediments in the Bashang Area, North China and its Environmental Significance. *Frontiers in Earth Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.891032>
- Малясова, Е. С., & Соколова, Л. Ф. (1967). Новые данные по стратиграфии озерных отложений центральной части Карельского перешейка. История озер Северо-Запада, 154-161 [Malasova, E. S., & Sokolova, L. F. (1967). Novye dannye po stratigrafii ozernyh otloženij central'noj časti Karel'skogo perešejka. Istorija ozer Severo-Zapada, 154-161].
- Нестеров, Е. М., Морозов, Д. А., Маркова, М. А., Егоров, П. И., & Боброва, А. М. (2019). Геохимическая индикация озерных отложений на Северо-Западе РФ. *Проблемы региональной экологии*, 1, 47-55. [Nesterov, E. M., Morozov, D. A., Markova, M. A., Egorov, P. I., & Bobrova, A. M. (2019). Geohimičeskaja indikacija ozernyh otloženij na Severo-Zapade RF. *Problemy regional'noj èkologii*, 1, 47-55.] <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-11047>
- Peti, L. & Augustinus, P. C. (2022). Micro-XRF-inferred depositional history of the Orakei maar lake sediment sequence, Auckland, New Zealand. *Journal of Paleolimnology*, 67, 327–344. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106607>
- Садоков, Д. О. (2022). *История озерного осадконакопления в северной части Молого-Шекснинской низменности в позднеледниковье и раннем голоцене* [Кандидатская диссертация, Санкт-Петербургский государственный университет] [Sadokov, D. O. (2022). *Istorija ozernogo osadkonakoplenija v severnoj časti Mologo-Šeksninskoj nizmennosti v pozdnelednikov'e i rannem golocene* [Kandidatskaja dissertacija, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennij universitet]].
- Соболев, В. И. (2014). *Рентгенофлуоресцентный анализ*. Издательство Томского политехнического университета [Sobolev, V. I. (2014). *Rentgenofluorescentnyj analiz*. Izdatel'stvo Tomskogo politehničeskogo universiteta].
- Субетто, Д. А. (2009). *Донные отложения озер: Палеолимнологические реконструкции*. РГПУ им. А. И. Герцена [Subetto, D. A. (2009). *Donnye otloženija ozer: Paleolimnologičeskije rekonstrukcii*. RGPU im A. I. Gercena].
- Шелехова, Т. С., Слуковский, З. И., & Лаврова, Н. Б. (2020). *Методы исследования донных отложений озер Карелии*. Карельский научный центр РАН [Šelehova, T. S., Slukovskij, Z. I., & Lavrova, N. B. (2020). *Metody issledovanija donnyh otloženij ozer Karelii*. Karel'skij naučnyj centr RAN].
- Трифонова, И. С. (1988). Многолетние исследования (1964-1984) оз. Красного как опыт экологического мониторинга мезотрофного озера // Методические аспекты лимнологического мониторинга. Л.: Наука. С. 5-8. [Trifonova I.S. (1988) Mnogoletnie issledovanija (1964-1984) oz. Krasnogo kak opyt èkologičeskogo monitoringa mezotrofnogo ozera // Metodičeskije aspekty limnologičeskogo monitoringa. L.: Nauka. S. 5-8.]

- Vyse, S., Herzs Schuh U., Andreev A., Pestryakova L., Diekmann B., Armitage S., & Biskaborn B. (2020). Geochemical and sedimentological responses of arctic glacial Lake Ilirney, chukotka (far east Russia) to palaeoenvironmental change since ~51.8 ka BP. *Quaternary Science Reviews*, 247, Article 106607. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106607>
- Wennrich, V., Minyuk, P. S., Borkhodoev, V., Francke, A., Ritter, B., Nowaczyk, N. R., Sauerbrey, M. A., Brigham-Grette, J., & Melles, M. (2014). Pliocene to Pleistocene climate and environmental history of Lake El'gygytyn, Far East Russian Arctic, based on high-resolution inorganic geochemistry data. *Climate of the Past*, 10(4), 1381–1399. <http://dx.doi.org/10.5194/cp-10-1381-2014>

Оригинални научни рад

UDC 544.052.5(285)(470.23)
<https://doi.org/10.2298/GSGD2401183K>

Примљено: 13. децембра 2023.

Исправљено: 10. фебруара 2024.

Прихваћено: 19. фебруара 2024.

Сергеј Комазец^{1*}

** Универзитет у Београду, Географски факултет, Београд, Србија*

ХОЛОЦЕНА И ПОСТГЛАЦИЈАЛНА ЈЕЗЕРСКА СЕДИМЕНТАЦИЈА У ЦЕНТРАЛНОМ ДЕЛУ КАРЕЛИЈСКЕ ПРЕВЛАКЕ НА ПРИМЕРУ ЈЕЗЕРА КРАСНОЈЕ У ЛЕЊИНГРАДСКОЈ ОБЛАСТИ

Апстракт: У овом раду обрађено је питање промене услова географске средине у постгласијалу и холоцену у централном делу Карелијске превлаке. У циљу палеогеографске реконструкције, спроведено је истраживање седимената дна језера Красноје (Лењинградска област, Руска Федерација), с обзиром да језерске наслаге представљају поуздан извор информација о природним догађајима из геолошке прошлости. Анализирана је велика количина података добијених поступком рентгенско-флуоресцентне анализе керна, извршено је литостратиграфско описивање седимената и интерпретиране су геофизичке карактеристике седимената дна. Они су били подељени на неколико јединица које су се разликовале низом својстава и одражавале различите услове седиментације. У реконструкцији прошлости природне средине нарочита пажња посвећена је палеоклиматским и палеоседиментолошким питањима.

Кључне речи: квартал, палеогеографска реконструкција, рентгенска флуоресцентна анализа, палеоседиментологија, геохемија

¹ sergejkomazec@yandex.com (аутор за кореспонденцију)
Сергеј Комазец (<https://orcid.org/0009-0005-5501-544X>)

Увод

Територија северозапада европског дела Русије и Карелијска превлака представљају простор од интереса за истраживање палеогеографских карактеристика природног окружења. То се првенствено односи на процесе регионалне глацијације, деглацијације, формирања језера и њихов развој и појаву савремене хидрографске мреже. Сви ови процеси били су условљени колебањем климе што се аналогно одражавало на промене у екосистемима и у целини на пределе. Истраживање карактеристика позног квартара у развоју планете Земље омогућава праћење трендова променљивости компонената природне средине.

Карелијска превлака је у квартару била подвргнута веома динамичним природним процесима. Њен специфични географски положај између два велика хидролошка објекта додатно појачава научни интерес за њено истраживање. Већ 70 година Красноје језеро служи као објекат проучавања хидролога, биолога, хемичара, ихтиолога, геолога, хидрофизичара, еколога и географа. Интерес биолога и еколога за језеро и њихова истраживања довели су до укључивања језера у листу заштићених споменика природе Лењинградске области. Поред тога, интересовање за стицање интегралног знања о географској и геолошкој еволуцији ове територије и даље остаје релевантно за геолошка, хидролошка и палеогеографска истраживања.

Дно језера представља једну од најважнијих компоненти језерског екосистема, док су његови седименти носиоци најпотпунијих информација о историји развоја водене средине у којој се таложе. Они представљају својеврсни запис најважнијих процеса – продукционо-биолошких и физичко-хемијских, који су се одвијали током читаве историје постојања језера (Калесник, 1967). Језерски седименти формиран у дужем временском периоду поуздан су извор информација о различитим догађајима из прошлости и садашњости. Климатске промене, катастрофални геолошки феномени, антропогени утицај на животну средину хронолошки се фиксирају у керновима језерских седиментата. Осим научног значаја, језерски седименти имају велико практичну примену као извори сировина за привреду (Шелехова et al., 2020).

Проучавање седимената дна језера на Карелијској превлаци у циљу палеореконструкција историје језера започело је 60-их година XX века (Суббето, 2009). Фокус рада био је на палеоклиматским питањима, а палеолимолошке реконструкције биле су ограничене несавршеношћу многих коришћених метода. Развој опреме и научних метода омогућио је проучавање седимената дна језера на вишем нивоу.

Карелијска превлака представља територију између Балтичког мора на западу и Ладшког језера на истоку. Простире се на површини од приближно 15 000 km². Од севера на југ дужина територије је 150-180 km, од запада на исток 55-110 km. У рељефу преовлађују глацијални облици попут моренских гредица, озова и камова. Просечна надморска висина је до 50 m, а највиша тачка је на коти 203 m (Лемболовско побрђе). Дуж обале залива протежу се гребени дина и узвишења (до 40 m надморске висине). Највећа река Карелијске превлаке је Вуокса. На неким местима се корито ове реке шири, а речна вода ујезерава формирајући тако речно-језерски систем Вуоксе. На превлаци има око 700 језера.

Многа живописна језера (попут језера: Отрадноје, Вуокса, Шучје, Велико Симагинско и др.), повезана су међу собом кратким језероузинама. Читав простор се налази у зони бореалних шума са доминацијом четинара (смрча, бор) и листопадних врста дрвећа (бреза, јасика).

Сл. 1. Топографска карта Карелијске превлаке (стр. 185)

Језеро Красноје се простире уз северне падине Лемболовског побрђа Карелијске превлаке на абразионо-акумулативној језерско-ледничкој равни. Језерски басен представља депресију изграђену од стена Балтичког штита, при чему његова дубина достиже 20 метара (Кузнецов, Суббето, 2019). Геолошка истраживања околине језера утврдила су флувиоглацијалне насlage укупне моћности 87,7 м, које належу на чврсте стене које су представљене биогитовим гнајсом и гранитом (Малясова, Соколова, 1967). Североисточна обала језера је скоро на целој дужини пешчана. Обрасла је боровом шумом која је проређена ливадама и пашњацима. У неким деловима обала је изграђена и од шљунка. Јужна и југозападна обала, у појасу од ушћа реке Странице до места где из језера истиче река Красноја, састављена је крупним стеновитим блоковима, а уз акваторију језера присутан је крупнији шљунак (Кириллова, Распопов 1971). Водни систем језера Красноје представља део Вуоксинског језерско-речног система који повезује Сајму и Ладугу. Површина језерског слива износи 168 km² и 18 пута је већа од површине самог језера. (Кондратјев, Бовыки, 2003). При просечном вишегодишњем нивоу воде у језеру, површина воденог огледала износи 9,13 km², док је максимална дубина је 14,6 m, а средња 6,6 m. Литорална зона се шири до дубине 2,0-2,5 m, протеже се уским појасом и заузима 17,3% површине језера (Трифорова, 1988).

Многа језера на северозападу европског дела Русије карактеришу се присуством акумулација манганских нодула у својим седиментима. По распрострањењу и резервама ових руда, језеро Красноје представља једно од најрепрезентативнијих. Рудна лежишта углавном су концентрисана у северозападном делу језера. Манганске конкреције су, у поређењу са седиментним стенама, обогаћене оксидима мангана (26,7%) и гвожђа (53,1%), док су сиромашне свим осталим макроелементима изузев фосфора (Baturin, 2019). Језеро Красноје је већ неколико деценија објекат мониторинга Лимнолошког института Руске академије наука. Научно-експериментална лимнолошка станица на језеру Красноје основана је 1949. године. Она се користи за спровођење експерименталних и регионалних експедиционих истраживања. Од 1964. године тамо се спроводе систематска комплексна лимнолошка истраживања и експериментални радови на проучавању унутрашњих процеса језера и процеса енергетско-материјалне размене у систему језерски слив-језеро.

Материјали и методе

Предмет непосредног истраживања били су седименти језера Красноје. Добијени су у процесу бушења и узорковања у оквиру истраживања језера у августу 2020. године, којим је руководио доцент катедре геоморфологије Института наука о Земљи Санктпетербуршког државног универзитета Григориј Фјодоров. На основу података прикупљених приликом поступка узорковања, дужина добијеног керна је износила 23,8 метара а који заправо представља стуб континуираних седимената која се условно може поделити на два дела. Доњи део керна је

представљао комплекс тракастих глина - варви, а горњи део је састављен од преваходно органских остатака (сапропел). Керн је скениран стандардним модуларним скенером керна (Standard Multi-Sensor Core Logger – MSCL) GeoTek у Институту за Океанологију П. П. Ширшов Руске академије наука у Москви. Керн је био физички подељен на два дела, од којих је један контролни, а други је био објекат непосредног истраживања у циљу литостратиграфског описивања и узорковања. У раду је коришћен литостратиграфски метод, који се заснива на проучавању карактеристика материјалног састава седимената, анализи макроскопске структуре седимената, текстуре, боје, карактера примеса, идентификацији основних и секундарних компоненти седимената и сл. На основу ових критеријума врши се рашчлањивање седимената и њихово упоређивање. У оквиру описивања било је потребно извршити идентификацију седимената, утврдити њихову структуру, која је заправо одговарала гранулометријском саставу, правилно измерити њихову дубину таложења, утврдити присуство органске материје или других примеса.

Сл. 2. GeoTek скенер керна (стр. 186)

Метода рентгенско-флуоресцентне анализе (XRF) заснива се на зависности интензитета рентгенске флуоресценције од концентрације елемента у узорку. При зрачењу узорка снажним протоком зрачења рентгенске цеви настаје карактеристично флуоресцентно зрачење атома, које је пропорционално њиховој концентрацији у узорку (Соболев, 2014). У проучавању загађења животне средине овом анализом може се доћи до сазнања о периоду деловања загађивача на слојева седимената или информације о просторно-временском обиму загађења, које се потом проверавају класичним геохемијским методама (Braden et al., 2019). Рентгенско-флуоресцентним скенирањем керна језерских седимената добијена је велика количина података о хемијском саставу седимената, са веома прецизним мерењем. Поступак мерења је извршен са размаком од 1 mm, а концентрације хемијских елемената су представљене у јединицама cps (counts per second). У сврху истраживања, изабрани су најрепрезентативнији хемијски елементи и односи елемената који најбоље приказују услове седиментације у прошлости. Пре графичког представљања расподеле хемијских елемената, почетни подаци су подвргнути поступку нормализације података.

За графички приказ резултата вертикалне расподеле магнетне суцептибилности и свих резултата геохемијске анализе (то су Fe, K, Ca, Si, Ti, S, Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti, Si/Al, Ti/Zr, Fe/Mn, Rb/Sr, K/Ti Ca/Ti, Zr/Rb) коришћен је програм OriginPro 2019. За графичку слику литолошког стуба коришћен је програм Starter 3. Статистичке и математичке анализе података рађене су у програму Microsoft Excel.

Резултати и дискусија

Литостратиграфска грађа седимената

Детаљним литостратиграфским описом керна језерских седимената издвојене су 2 зоне (сл. 4.) Горња зона (зона II) је представљена органогеним седиментима који су се акумулирали у холоценој епоси, укупне моћности 16,2 метра. На овој дубини се мења механички састав седимената. Сапропел замењује глина и до

краја проучаваног керна, седименти су представљени глинама (варвама). То је зона I, а карактерише се наизменичном сменом слојевитих глина и слојева ситнозрног песка. Седименти у зони II формирану су изумирањем живих организама језера током последњих неколико хиљада година и по својој структури су прилично хомогени. Сапропел повећањем дубине постаје слојевитији и у њему се примећује више остатака материјала у облику теригених честица алевритске и псамитске фракције.

Сл. 3. Промена услова седиментације-прелазак сапропела у седименте глине (архива аутора) (стр. 187)

Сл. 4. Графички приказ литостратиграфског стуба језерских седимената језера Красноје (стр. 188)

Доњи део керна, постгласијални, говори о догађајима који су се догодили након дегласијације Карелијске превлаке и ослобађања копна од леденог покривача, тј. када је већ формирано првобитно језеро и када се акумулирала глина у зимским периодима и ситнозрни песак, светле нијансе, који су притоке језера доносили у летњим условима. Укупна моћност седимената зоне I зоне је 5,33 метра.

Физичке карактеристике седимената

На кривој показатеља магнетне суцептибилности (сл. 5.) могу се издвојити два дела која се разликују апсолутном вредношћу и динамиком промене. До дубине од око 15,8 m, вредности магнетне суцептибилности варирају у уском распону од 0 до 20 x 10⁻⁵ јединица SI, а затим се тенденција повећања овог параметра наставља до краја керна, достижући максималне вредности на 19-20 метара, тако да се у доњем делу стуба седимената опажају максималне вредности (до 72,945 x 10⁻⁵ SI). Након максимума од 19,55 m, вредности магнетне суцептибилности имају тренд опадања одржавајући високе вредности. На дубини од 20,5 m вредности се поново повећавају.

Горњем делу керна са ниским вредностима магнетне суцептибилности одговара зона II у којој доминирају органски седименти који су по својој природи слабо магнетични и део су групе дијамагнетика. Промена вредности магнетне суцептибилности прати промену механичког састава седимената и у зони I има прилично високе вредности. Ови показатељи говоре да је у овом периоду унос кластичног материјала у језеро био максималан и заправо указује на висок интензитет ерозије и ниску биопродуктивност језера.

Сл. 5. График промене магнетне суцептибилност (стр. 189)

Анализа геохемијских својстава седимената

На основу анализе графика промене концентрације хемијских елемената, примећују се синхрона колебања садржаја литофилних елемената као што су гвожђе, титан, калцијум, силицијум и калијум (сл. 6.). Горњи део (литолошка зона II) компаративног графика, литолошки представљен органогеним муљем, показује сталну синхрону промену низа елемената (Si, Ca, Fe), а слично се понашају и графици титана и калијума. Тај део графика је монотон, без оштрих колебања, али са приметном променљивошћу и закономерношћу криве расподеле. На пример, ако пажљиво анализирамо графике расподеле Si и Ca, може се уочити велика сличност. Сегменти на дубинама 5,53-7,47 m, 7,47-9,21 m и 10,28-12,38 m се веома добро слажу између горе поменутих елемената. Само се график гвожђа

разликује вишим апсолутним вредностима, у поређењу са осталим елементима, и падом вредности након достизања максимума на 13,46 m. Графици појединачних елемената идеално прате највидљивију промену литолошких карактеристика седимената, где органогени сапропел прелази у глине на дубини од 16,15/16,20 m. На таквој дубини на кривама свих елемената примећује се нагло повећање вредности након малог пада на дубини од 16 метара.

Израженија динамика промене концентрације хемијских елемената се примећује у доњем делу литостратиграфског стуба (литолошка зона I). У подзони I-г постепено се повећавају концентрације елемената, али највише вредности елементи достижу на нивоу 17,65-19,45 метара, а то је подзона I-в у којој сви елементи имају максималне вредности (и до 6 пута више него просечна концентрација у зони II). Она је прилично равномерно представљена високим концентрацијама које прате скоро потпуно одсуство било ког тренда криве. На средини подзоне, тачније на дубини од 18,40 m, појављује се приметан синхрони пад вредности, али се брзо поново успостављају високе вредности концентрација. Почевши од дубине од 19,45 m, примећује се смањење вредности, са апсолутним вредностима које су мало више него у подзони I-г. Већ на 20,20 m, високе концентрације се враћају, али само до двадесет првог метра, где се вредности смањују до краја графика. Последњи сегмент представља подзону I-а.

Сл. 6. Литолошка грађа и упоредни графици вертикалне дистрибуције садржаја литофилних елемената (Fe, Ti, Ca, Si, K) (стр. 190)

На слици 7. приказани су графикони вертикалне дистрибуције сумпора и односа Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti. Ови графикони се разликују и од графика појединачних елемената и међу собом, али одређена понављања се и даље примећују. Ово се односи на Fe/Ti и Si/Ti графиконе и на S и Mn/Fe графиконе. Fe/Ti и Si/Ti графици садрже максималне вредности у горњем делу графика до дубине од приближно 9,2 метара. Унутар овог сегмента налази се велики број пикова који су равномерно распоређени. Један од најзначајнијих пикова је на нивоу 16,12 m на граници прве и друге зоне. У зони I, вредности су ниског интензитета са минималним концентрацијама до дубине језгра. Расподела односа Mn/Fe нагло повећава своје вредности до дубине од 14,6 m, а затим постепено опада до краја литостратиграфског стуба. Највеће вредности показује у интервалу дубина 9,26-16,1 m. График концентрације сумпора показује равномерни тренд повећања вредности до 16,2 метра, а затим смањење концентрације, које задржавају просечне вредности за овај график.

Сл. 7. Литолошка грађа и упоредни графици вертикалне дистрибуције односа садржаја литофилних елемената (Mn/Fe, Fe/Ti, Si/Ti) и S (стр. 190)

Главне фазе и услови језерске седиментације

Динамика геохемијских промена основних литофилних елемената поделила је прву зону на мање сегменте тј. подзоне (подзоне I а-г). У зони I је дошло до најјачег уноса кластичног материјала у језеро, о чему сведочи повећање концентрације литофилних елемената (Si, Ca, K, Ti), резултати магнетне суспектибилности и литолошке карактеристике са доминацијом песковитих и глиновитих седимената. Такви показатељи карактеришу теригени тип седиментације. Титанијум је релативно имобилан елемент, присутан је као уобичајена компонента у

различитим минералима (на пример: рутил, титаномагнетит) и тако је обично повезан са уносом еродованог материјала (Wennrich et al., 2014).

У периодима који одговарају подзонама I-a и I-b, догодила се максимална алогена акумулација и тада је на копну доминирала механичка водна ерозија, а клима је била релативно хладна. Високе вредности Al/Ca у овим подзонама тумаче се као периоди са појачаним речним отицањем и одговарају влажној фази климе у унутрашњости копна (Davies et al., 2015). Између ова два периода, драматично смањење неорганских компоненти седимената и нека врста заустављања минералне акумулације показује прелазак на повољније и топлије климатске карактеристике природне средине, са ниским интензитетом ерозије у сливу.

График Ca/Ti добро показује релативну промену литогене и биогене седиментације. У подручју дубина 0-6,2 метра примећује се много пикова концентрација, а највећи пик на 16,2 m где и по литолошким подацима долази до промене биогене и литогене седиментације. Висок интензитет односа Ca/Fe у подзонама I-a, I-b и I-g заједно са драматичним смањењем Fe/Ca, указује на прилив кластичног материјала са копна. Уједначено повећање Ti/Ca у тој зони потврђује такве закључке. Однос Mn/Fe користи се за процену редокс услова (Peti & Augustinus, 2022). Веће вредности Mn/Fe користе се за тумачење већег присуства кисеоника пошто се Mn лакше редукује у анаеробним условима од гвожђа (Vyse et al., 2020). У горњем делу графика параметар има стабилан тренд повећања вредности. Међутим, прва четири метра релативно ниске вредности Mn/Fe указују на погоршање услова за органски свет тј. повећање вредности овог индикатора у интервалу од 9-15 метара. Максимална његова вредност на дубини од 14-16 метара, може се окарактерисати као период седиментације са најизраженијим оксидационим условима у језеру, у целом разматраном периоду. У овом периоду сапропел се интензивно акумулира док је биопродуктивност језера била веома висока. У зони I, константно ниски и постојани односи Mn/Fe указују на редукционе услове. Такође, високе вредности сумпора у овој зони потврђују такву претпоставку (Нестеров et al., 2019). Поред тога, у подзонама I-a и I-g, однос Fe/Mn се значајно повећава и може сведочити о редукционим условима седиментације. У редукционој средини растворљивост Mn се повећава, али је Mn је више подложен утицајима (Boyle, 2001), тако да повећање односа Fe/Mn може указивати на појаву анаеробних услова. У подзони I-g, постепено повећање параметра Mn/Fe говори о постепеном обогаћивању кисеоником језера и органском производњом. Повећање вредности Mn/Fe на дубини од 9-15 m може се приписати регресији воде и смањењу површине језера у раном холоцену (Садоков, 2022).

Ниска вредност индикатора K/Ti до дубине од 10,2 m означава смањење физичког уноса материјала са копна и смањење наслага глине. А управо органогеним седиментима доминира овај део керна. У подзонама I-g и I-b постепено се повећава вредност односа K/Ti, задржавајући релативно ниске вредности, што указује на повећање интензитета акумулације глиновитих седимената (Davies et al., 2015). У подзонама I-a и I-b ово повећање је још израженије, са благим падом на 21. метру. У овим подзонама високе вредности индикатора потврђују погоршане услове околине са израженим физичким распадањем стена у условима хладне климе.

Однос Rb/Sr може се користити као показатељ хемијске ерозије у сливу и на тај начин индиректно као показатељ хладних и топлих периода развоја климе (Liu et al., 2020). Стронцијум површинским отицањем улази у језеро у облику слободног јона при хемијском растварању. Тако се повећава количина стронцијума у језерским седиментима због физичке адсорпције (органске материје) и/или хемијског таложења (карбонати) (Fernández et al., 2013). Стронцијум има тенденцију да буде покретнији у топлим и влажним условима. Вертикална дистрибуција овог односа је прилично стабилна, али постоје одређене флукуације у зони I. У подзони I-г вредности задржавају висок интензитет као и у вишим слојевима. Већ у подзони I-в долази до постепеног смањења вредности и вероватне промене услова средине у повољније. Ниска вредност односа Rb/Sr у подзони I-б повезана је са повећаном хемијском ерозијом и указује на период развоја ка топлијој и влажнијој клими. У подзони I-а примећује се раст овог геохемијског показатеља што може да кореспондира са захлађивањем и аридизацијом палеоклиме. Вредности односа Si/Al и Zr/Rb у зони II указују на повољне услове природне средине (Vyse et al., 2020). Ово је посебно изражено у интервалима дубине 4-5 m и 12,3-14,2 m. Повећање садржаја титана у доњој половини графика и нагли пад резултата Zr/Rb указује на већи унос ситнозрног кластичног материјала. Однос Ca/Ti одражава садржај биогених карбоната (Davies et al., 2015). Заправо, може се сматрати да однос Ca/Ti у целини одражава биогену продуктивност. На графикону преовлађују пикови овог индикатора управо у делу са органогеним седиментима, с тим што се њихова фреквенција повећава у дубинама од 5 до 10 m. На формирање биогеног силицијум-диоксида у зони II указују високе вредности Si/Ti и Si/Al у интервалу дубина од 4-9 m и 13-15 m.

Органогени режим је доминирао у холоценој фази седиментације (зона II) и тада су се акумулирале моћне насlage сапропела. Језерска продукција је била интензивна, воде при дну су биле обогаћене кисеоником и обезбеђивале су могућност развоја бујне вегетације. Клима је била топла и влажна, са не тако јако израженом динамиком. Ово је период са смањеним физичким распадањем стена у сливу и заустављањем седиментације глинених наслага. Искључиво су се одлагали остаци изумрлих организама. Претпоставља се да је у раном холоценоу језеро смањило своју површину, што може бити повезано са периодом нестајања Балтичког леденичког језера и формирања језера мање површине и мањих дубина.

Зона I у целини представља постглатијал и прилично променљив период у процесу језерске седиментације. Тада је доминирао унос теригеног материјала који су уносиле воде отопљених леденика, што заправо означава минерални режим седиментације. Динамика колебања геохемијских показатеља поделила је зону I на неколико самосталних јединица са различитим условима седиментације. У подзони I-г клима је била хладна и акумулирале су се глине. Слични услови се примећују и у подзони I-а када је доминирало физичко распадање стена, у великој количини је притицао теригени материјал на рачун појачаног површинског распадања, а преовладавали су редукциони услови.

Табела 1. Реконструкција палеогеографског окружења на основу динамике геохемијских показатеља по литостратиграфским јединицама

Зона/подзона	Дубина (m)	Геохемијски индикатори	Режим седиментације	Интерпретација
I-a	20,20-21,57	Висока концентрација литофилних елемената, пад Pb/Sr, повећање K/Ti и Fe/Mn	минерални	Појачана механичка ерозија у сливу, хладна и аридна клима, редукциони услови
I-b	19,45-20,20	Смањење садржаја литофилних елемената, ниска вредност Rb/Sr	минерални	Унос кластичног материјала се смањује, доминација хемијске ерозије, топла и влажна клима
I-в	17,65-19,45	Максималне вредности литофилних елемената, пад Rb/Sr повећање K/Ti	минерални	Акумулација глиненних седимената, клима је умерена, појачан је речни протицај и унос кластичног материјала
I-г	16,2-17,65	Повећање концентрације литофилних елемената, раст Fe/Mn, Al/Ca Pb/Sr	минерални	Акумулација глиновитих седимената, редукциони услови, захлађење климе
II	0-16,2	Стабилна ниска вредност литофилних елемената (K, Ca, Fe, Si), високе вредности Fe/Ti, Si/Ti	органогени	Топла и влажна клима, оксидативни услови, динамика променне површине језера, акумулација биогених наслага

Закључак

Након деглацијације, територија Карелијске превлаке подвргнута је динамичним природним процесима, пре свега хидролошким. Формирала су се мора, језера, повезивале се и изоловале водене површине и постепено формирала савремена хидролошка мрежа. На примеру проучавања дна језера Красноје реконструисана је палеогеографска средина у централном делу Карелијске превлаке. Литостратиграфски и геохемијски подаци показали су два типа режима седиментације - органогени холоцени и минерални постгласијални. Велика моћност органогених седимената указује на повољну климу и добре услове за развој живог света у језеру. Постгласијални део је представљен моћним глиновитим седиментима. На основу геохемијске анализе добијени су прилично променљиви резултати који су показали разноврсну смену постгласијалних услова који се односе на палеоклиму и палеоседиментацију. Дошло је до

наизменичне смене периода са топлијом климом и доминацијом хемијске ерозије и периода са хладнијим условима средине и појачаним уносом теригеног материјала.

У овом раду су коришћене веома прецизне геофизичке и геохемијске методе са високом поузданошћу добијених података. Први пут је у проучавању језера Красноје примењен такав савремени приступ за проучавање реконструкције палеогеографских прилика. Истраживање је показало да се геохемијским методама односно проучавањем концентрације хемијских елемената и њихових односа у седиментима може поуздано тумачити стање природних компонената у геолошкој прошлости и њихова варијабилност у времену. Методологија примењена у раду могла би представљати основ за даља проучавања језерских седимената на територији северозапада европског дела Русије, с обзиром да су савремени инструменти омогућили детаљну, егзактну и поуздану анализу кернова седимената, а самим тим и боље и прецизније тумачење добијених резултата.

Међутим, и поред резултата овог рада за свеобухватно истраживање услова животне средине у прошлости потребно је укључити читав низ палеогеографских метода. Пре свега биле би то биостратиграфске методе (анализа дијатомеја, палинолошка анализа), методе датирања и методе за добијања података о органском угљенику и азоту.

© 2024 Serbian Geographical Society, Belgrade, Serbia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Serbia.

Литература (погледати у енглеској верзији текста)