

The state of aquatic ecosystem according to hydrochemical and hydrobiological indicators of the Kizhi skerries area of Lake Onego during the ice period

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Sidorova A.I.^{1*}, Zobkova M.V.¹, Fomina Yu.Yu.^{1,2},
Slastina Yu.L.¹, Makarova E.M.¹, Sidorov S.M.^{1,3}

¹ Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Prospekt Aleksandra Nevskogo, 50, Petrozavodsk 185030, Respublika Karelia, Russia

² Karelian Branch of the State Scientific Centre of Russian Federation, Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Fisheries and Oceanography", ul. Anokhina, stroenie 29A, Petrozavodsk 185035, Respublika Karelia, Russia

³ Petrozavodsk State University, Prospekt Lenina, 33, Petrozavodsk 185910, Respublika Karelia, Russia

ABSTRACT. For the first time during the ice-covered period, comprehensive hydrochemical and hydrobiological studies were conducted in the area of Kizhi Island on Lake Onego. During winter, average concentration of total phosphorus was 7 µg/l, which corresponds to oligotrophic water types. The concentrations of iron, manganese and pollutants (including petroleum products and synthetic surfactants) did not exceed the maximum permitted levels for fishery water bodies. The results of hydrochemical analysis suggest that the water quality in the Kizhi skerries is satisfactory. The study area is characterized as oligotrophic with elements of β-mesotrophy determined by hydrobiological indicators (bacteria, phytoplankton, zooplankton and macrozoobenthos).

Keywords: chemical indicators, bacterioplankton, chlorophyll *a*, phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos

For citation: Sidorova A.I., Zobkova M.V., Fomina Yu.Yu., Slastina Yu.L., Makarova E.M., Sidorov S.M. The state of aquatic ecosystem according to hydrochemical and hydrobiological indicators of the Kizhi skerries area of Lake Onego during the ice period // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 515-529. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-515

1. Introduction

In the recent decades lakes in the Northern Hemisphere have experienced later freeze-up (by 1.6 days per decade) and earlier ice break-up (1.9 days per decade), as well as a reduction in the ice cover duration by 4.3 days per decade (Benson et al., 2012). For example, in Lake Ladoga ice cover is formed 1–6 days later and is broken 14 days earlier. In Lake Onego, the ice cover period decreased by 50 days over 60-year observations (1955–2015). Trends towards shorter ice-covered period were also observed in the water bodies of the Republic of Karelia: Segozero, Topozero, Vygozero, Syamozero, Vodlozero, Rugozero, Tulmozero (Filatov et al., 2014; Efremova and Palshin, 2017; Filatov et al., 2019). Such changes in the thermal regime of the lake can cause shifts in such principal phenological processes as spring plankton succession, and also lead to changes in the trophic network and carbon flows in the ecosystem (Hampton et al., 2015; Kalinkina et al., 2021). Tracking environmental changes in large lakes requires interdisciplinary studies of the winter ecosystem.

Lake Onego is located in the European North of Russia and it is the second largest freshwater lake in Europe. In its natural state, the lake covers an area of 9,720 km² 250 km² of which are occupied by 1,500 islands. Lake Onego is one of the largest, temperate, cold-water basins covered with ice from December (sometimes January) to mid-May for 120–164 days (Lake Onego..., 2010).

Hydrochemical and hydrobiological indicators (bacterioplankton, phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos) in the Kizhi skerries area of Lake Onego during the growing season have been studied in sufficient detail (Vislyanskaya et al., 1999; Galakhina et al., 2022; Fomina and Sidorova, 2024; Makarova, 2025; Smirnova, 2025, etc.), but not during the winter. In addition, the subglacial period of aquatic communities is an integral part of the annual cycle. Winter is particularly important for the species that reproduce under ice, such as glacial relicts *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863 and *Monoporeia affinis* (Lindström, 1855).

*Corresponding author.

E-mail address: bolt-nastya@yandex.ru (A.I. Sidorova)

Received: June 14, 2025; **Accepted:** July 31, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



The aim of the study is to examine the state of the ecosystem in the Kizhi skerries area of Lake Onego during the winter.

2. Materials and methods of research

2.1. Sampling

The Kizhi Archipelago is located in the northern part of Lake Onego and consists of many islands, the most famous of which is Kizhi Island. This area of the lake is characterised by shallow depths (up to 10 m), well-warmed water, relatively slow water exchange and increased shipping traffic as a result of tourist activity.

Water samples were collected in February 2025 at 10 stations near Kizhi Island (Fig. 1). It is likely that pollutants accumulate in winter under slow water-exchange conditions in the bottom layer of water. Water samples were taken from both surface and bottom horizons at stations Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 and ZOT at the depths of 5.0–9.8 m, while sampling at shallow stations ZW1, ZW3, ZW4 and ZW5, where the depths did not exceed 2.5 m, was carried out only from the surface. Sampling points were selected close to potential sources of anthropogenic load. Thus, stations ZW1, ZW3, ZW4 and ZW5 were located near the sewage effluents from local wastewater treatment facilities, stations Z2, Z4 and ZOT – in the area of intense shipping traffic. The monitoring stations are represented by gray silt in the skerries area of the reservoir.

Bacteria and phytoplankton were sampled using a Rutner bathometer, zooplankton by a Juday plankton net (diameter 18.5 cm; mesh size 100 μm). Quantitative benthos samples were collected using an Automatic box bottom grab (area 0.025 m^2) at each station, two samples were washed with a No. 23 sieve and fixed with 4% formalin. At each station, a CastAway-CTD sensor was used to measure the water temperature, which ranged from 0 to 2.5 $^{\circ}\text{C}$ (Fig. 2).

2.2. Hydrochemical indicators

Ionic composition (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), organic matter content (total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD_{Cr} and COD_{Mn}), color, biochemical oxygen demand during 5 days (BOD_5)), nutrients (total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (P-PO_4), total nitrogen (TN), total organic nitrogen (TON), total inorganic nitrogen: N-NH_4 , N-NO_2 , N-NO_3), Fe, Mn, Si, gas composition (CO_2 , O_2), pollutants – oils, synthetic surface-active substance, total suspended solids (TSS), conductivity (κ) and pH were analyzed in the water samples. The chemical composition of the water was determined using standard methods (Lozovik and Efremenko, 2017).

2.3. Microbiological analysis

The total bacterial abundance, their biomass and average cell volumes were determined in five samples taken under the ice from the surface water.

The total bacterial abundance was assessed by direct calculation on black Whatman polycarbonate

track membranes ($D_{\text{pore}} = 0.2 \mu\text{m}$) using a luminescent microscope MIKMED-2 (magnification $\times 1600$) with preliminary acridine orange staining (Handbook of Methods..., 1993). Cell sizes were measured with a computer program MultiMedia Catalog (MMC) offering an option of scale calibration. The average cell volume was calculated as the volume of stereometric figures matching their shape (Krambeck et al., 1981; Kuznetsov and Dubinina, 1989). Bacterial biomass was calculated from the product of the mean bacterial cell volume and total bacterial abundance (Kuznetsov and Dubinina, 1989).

Water quality was assessed according to ecological status classification of land surface waters, applying total bacterial abundance values (Oksiyuk et al., 1993). Was used the classification (Kopylov and Kosolapov, 2007) to determine the trophic status of the Kizhi skerries based on the total bacterial abundance, their average volume and biomass.

2.4. Determination of chlorophyll a and phytoplankton

Pigments were determined by the standard spectrophotometric method (Determination..., 1966; GOST, 2001) using a mixed 90% acetone extract. A 1-liter sample was concentrated on Vladipor MFAS-OS-3 membrane filters ($D_{\text{pore}} = 0.8 \mu\text{m}$) using direct filtration. Optical density of the extracts was measured on a Super Aquarius Cecil CE 9500 series 9000 spectrophotometer. The concentration of chlorophyll a (Chl a) was calculated using the equations given in the UNESCO manual (Determination..., 1966) and modified by Jeffrey and Humphrey (Jeffrey and Humphrey, 1975).

The 500 ml water samples were fixed with 10 ml of 40% formalin and concentrated on membrane filters ($D_{\text{pore}} = 0.8 \mu\text{m}$) to 5 ml (Kuzmin, 1975; Fedorov, 1979; Methods..., 2024). Laboratory processing of phytoplankton samples was carried out using a Nageotte chamber (0.01 ml) and a Mikmed-6 microscope with

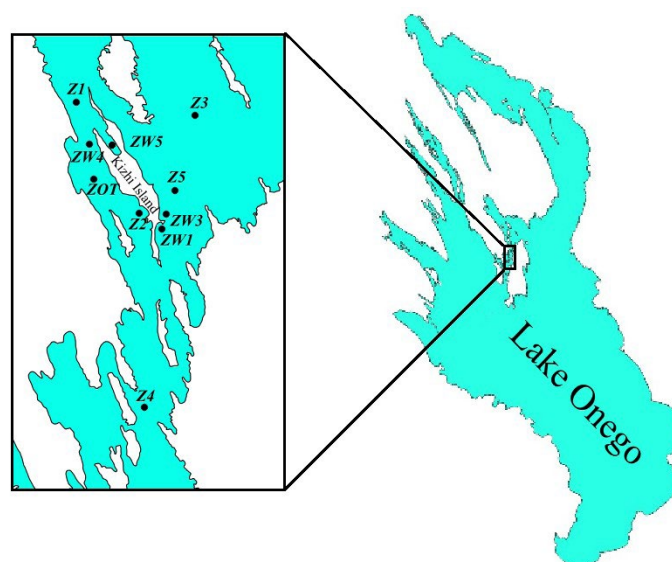


Fig.1. Schematic map of sampling stations during the ice cover period of 2025.

an oil objective (magnification $\times 400$ –1000), the number and individual volumes of algal cells were counted. Biomass was calculated by the volumetric counting method using volume formulas for similar stereometric figures (Kuzmin, 1984; Tikkanen, 1986). Taxonomic identification of phytoplankton was carried out using Identification Guide to Freshwater..., 1951–1986; Krammer and Lange-Bertalot, 1986; 1988; 1991a; b; Matvienko, 1954; Tikkanen, 1986). Species with abundance and/or biomass of more than 10% were considered dominant. Specific richness (n) was calculated (the number of taxa of a rank lower than genus in a unit volume of water (in a sample)).

Based on the Chl *a* content and the level of phytoplankton biomass, an assessment of the trophic status of the studied area of Lake Onego was carried out according to the classification by S.P. Kitaev (2007), the saprobic water zone was determined according to Oksiyuk et al. (1993).

2.5. Identification of zooplankton

Copepoda species were categorized by size and age (younger copepodites (stages 1–3), older copepodites (stages 4–5)), and sex ratio (males, females, females with eggs). Calanoida and Cyclopoida nauplii, except for *L. macrurus*, were not identified to the species level; they were combined into two groups and distinguished by size (small, medium, and large). A standard technique was used for network sampling and in-house sample processing (Methods..., 2024). Zooplankton identification was carried out according to Alekseev and Tsalolikhin (2010).

2.6. Identification of macrozoobenthos

Laboratory processing included sample analysis in accordance with standard methods for collection and primary processing of material (Methods..., 2024). Organisms were selected from the ground using an MSP-2 variant 2 stereoscopic microscope in a modified Bogorov chamber, specially designed for dissecting benthic samples under a microscope. The organisms were weighed in their raw state with an accuracy of 0.0001 g. The dissected and weighed material was fixed with 70% ethanol. Taxonomic identification was carried out using a guide of Alekseev and Tsalolikhin (2016).

2.7. Statistical analysis

Differences in chemical indicators observed on the stations in the Kizhi skerries were determined using an independent ANOVA test with a statistical significance threshold (*p*) of 0.01. Free Sofa Statistics (1.4.6) software (<http://www.sofastatistics.com>) was used for statistical data processing. A nonparametric Mann–Whitney U Test was used to compare hydrobiological indicators of the samples. Statistical processing of hydrobiological data was performed using the licensed package Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

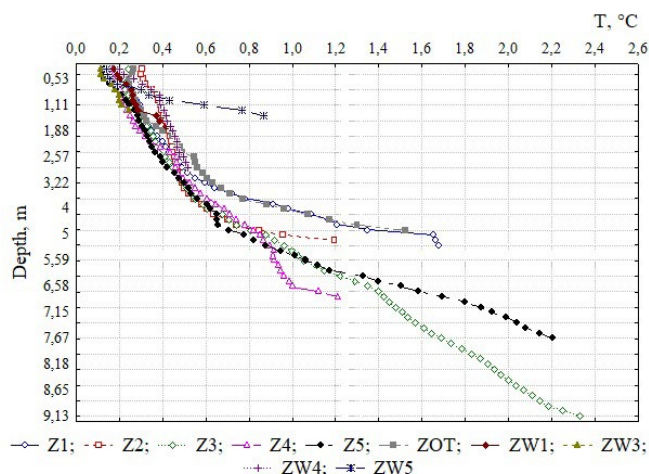


Fig.2. Water temperature at the stations (Z1–Z5, ZOT, ZW1, ZW3–ZW5) in the Kizhi skerries area of Lake Onego during the ice cover period of 2025.

3. Results and discussion

3.1. Hydrochemical indicators

There were no statistically significant differences in all hydrochemical parameters monitored at the Kizhi skerries stations (ANOVA test, $p > 0.01$). Moreover, no divergency in the concentration values of the hydrochemical constituents was observed in the surface and bottom water layers. It is suggested that pollutants were not accumulated in the bottom layer implying probable absence of anthropogenic pressures in this lake area during winter. Since the parameters were similar at all of the stations and depths, their average values with standard deviation were provided.

Generally, the water in Lake Onego is weakly mineralised. In the Kizhi skerries, the total dissolved solids averaged 39.5 ± 0.7 mg/l, and the ionic composition, expressed as %-eq., was as follows:

$$\frac{Ca^{2+}(50)Mg^{2+}(31)Na^{+}(16)K^{+}(2.8)}{HCO_3^{-}(62)A_{org}(14.0)SO_4^{2-}(14)Cl^{-}(7.4)NO_3^{-}(1.9)}$$

According to the classification of Alekin (Alekin et al., 1973), the lake waters belong to the hydrocarbonate class, group Ca, Lozovik (Lozovik, 2013) classified them as medium-alkaline, circumneutral. Oxygen concentrations varied between 10.4 and 13.5 mg/l, and carbon dioxide concentrations – between 2.4 and 7.5 mg/l. Dissolved oxygen saturation was quite high and ranged from 71 to 92%.

The concentrations of total and mineral phosphorus were low (on average 7 ± 1 and 1 ± 1 μ g/l, respectively). Therefore, according to the classification of Lozovik (Lozovik, 2013), water of the Kizhi skerries is of oligotrophic type. However, it should be noted that during the open water period, the concentrations of TP were higher (Bulletin..., 2005; 2013; Galakhina et al., 2022), which were apparently caused by an increase in suspended form of phosphorus due to constant turbidity of bottom sediments owing to intense shipping activity. This is confirmed by the higher concentration of total suspended solids during the open water period,

which was on average 2.1 ± 1.0 mg/l (Galakhina et al., 2022). In winter, according to the results of this study, TSS concentration averaged 0.3 ± 0.4 mg/l.

During the ice cover period, average concentration of total nitrogen was 0.37 ± 0.02 mg/l and nitrates – 0.16 ± 0.02 mg/l, which was significantly higher than in other seasons (Fig. 3). This was the result of active consumption of N-NO_3 by phytoplankton and bacteria during the open water period, their concentration in Lake Onego gradually decreased from spring to autumn (Sabyulina and Ryzhakov, 2018). The organic form of nitrogen prevails in the total nitrogen composition (Fig. 3), which is generally typical for the water bodies of Karelia. The silicon content in water averaged 0.67 ± 0.13 mg/l.

The organic matter concentration in the water of the Kizhi skerries was low and slightly varied on the stations. This is confirmed by direct determination of TOC (average 6.5 ± 0.2 mg/l) and indirect parameters (color – 33 ± 3 mg Pt-Co/L, COD_{Cr} – 18.4 ± 0.9 mgO/l, COD_{Mn} – 6.7 ± 0.6 mgO/l). Thus, the water of the studied area, according to the classification of Lozovik (Lozovik, 2013) is of oligohumic type. BOD_5 values ranged from 0.10 to 0.61 mg O_2 /l, typical for the winter with an almost complete absence of easily oxidizable organic matter production. This is also indicative of the absence of anthropogenic load in this area in winter.

The concentrations of iron and manganese in the water of the Kizhi skerries in winter averaged 0.07 ± 0.02 and 0.01 ± 0.005 mg/l, respectively; therefore, exceedances of maximum permissible concentrations (MPC) of the Russian Federation (Water Quality Standards, 2016) were not registered. Higher concentrations of Fe and Mn were found during the open water period and, as in the case of phosphorus, this was probably caused by intensive navigation in this area of the lake. The concentrations of oils and synthetic surface-active substances were 0.04 ± 0.03 and 0.01 ± 0.01 mg/l, respectively, and did not exceed MPC. In the case of oils, it is associated with the absence of transport load during the ice cover period.

3.2. Bacterioplankton

Bacterioplankton is evenly distributed in the subglacial water layer of the Kizhi skerries. The total bacterial abundance, biomass and average cell volumes are characterized by small values (Table 1).

During the ice cover period, average cell volume and total bacterial abundance were half as much and the bacterial biomass was four times less than in summer (Makarova, 2025). The Mann-Whitney U-Test showed statistically significant ($p < 0.05$) differences between summer and winter indicators of total bacterial abundance, bacterial biomass and average cell volume. This is mainly due to a limited supply of organic matter from the coastal areas. It is known that cell volume, and, therefore, biomass, depend on the availability of organic matter and biogenic elements (Potayenko, 1979), which decrease in concentration during the winter. In addition, a number of factors,

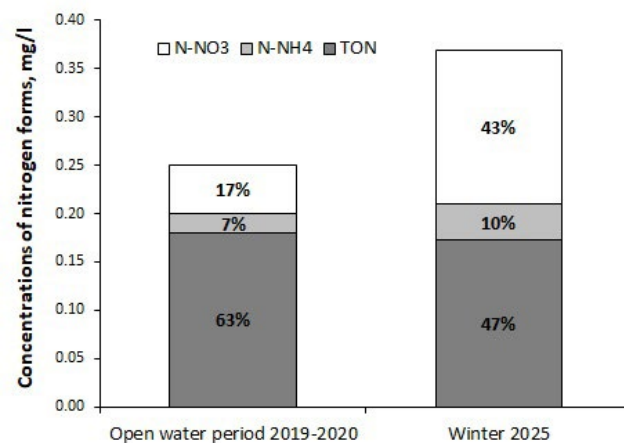


Fig.3. Distribution of nitrogen forms in the water of the Kizhi skerries of Lake Onego during the open water period of 2019–2020 (Galakhina et al., 2022) and in the winter of 2025.

Table 1. Spatial distribution of total bacterial abundance (TBA), bacterial biomass (BB) and average cell volume (V_{av}) in the subglacial water layer of the Kizhi skerries, Lake Onego.

Stations	TBC, mln cells/ml	V_{av} , μm^3	BB, mg/L
Z1	1.59	0.05	0.061
Z2	1.4	0.046	0.09
Z3	1.21	0.054	0.088
Z4	1.3	0.044	0.103
Z5	1.49	0.044	0.071

such as low water temperatures, weak mixing of water masses and absence of direct anthropogenic influence, limit the development of bacteria in winter.

The water quality in the subglacial layer of the Kizhi skerries is assessed as clean. The water area near Kizhi Island is characterized as oligotrophic based on the average values of bacterial cell volume, their biomass, and bacterial abundance.

3.3. Chlorophyll a and phytoplankton

In February 2025, the content of Chl *a* in the subglacial water of the Kizhi skerries area of Lake Onego varied from 0.85 to 0.33 $\mu\text{g/l}$ in the surface layer and from 0.42 to 0.19 $\mu\text{g/l}$ at the bottom. The highest value was registered at station Z1 and the lowest at station ZW1. At all observation stations where samples were taken from several layers, a decline in the pigment concentration was observed from the surface to the bottom. Non-parametric analysis using the Mann-Whitney U-Test revealed statistically significant ($p < 0.05$) differences between the indicators of the subglacial (surface) and bottom water layers. Comparison of data on Chl *a* and phytoplankton showed that this difference between water layers may be due to the onset of phytoplankton vegetation. The average value of Chl *a* during the ice-covered period was 0.49 ± 0.21 $\mu\text{g/L}$, which is significantly lower during active phytoplankton vegetation – an average of 2.7 $\mu\text{g/L}$ from 1965 to 2008 (Lakes of Karelia, 2013).

In winter 2025, 36 species and intraspecific taxa of algae from six systematic groups were found in the water under the ice. In terms of abundance and biomass, diatoms predominated, mainly *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim., but at some observation points, we noted growth of cyanobacteria and dinoflagellates (Dinophyceae). At station Z2, near the water transport pier, the cyanobacteria *Aphanocapsa elachista* var. *Elachista* W. Et G. S. West. was higher in abundance. At station Z4, the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. made up 90% of the biomass, but the dinoflagellate *Parvodinium inconspicuum* (Lemm.) Carty. and *Ceratium hirundinella* (Müll.) Duj. were the main contributors to the biomass (83%). At all observation stations, despite intensive vegetation of *Aulacoseira islandica* dominating in the oligotrophic period, the development of cyanobacteria (*Anathece minutissima* Kom., Kašt. & Jezber. (2011), *Oscillatoria planctonica* Wolosz., *Aphanizomenon flos-aquae* (Linne) Ralfs), as well as chlorococcal algae was noted. The abundance and biomass of subglacial phytoplankton ranged from 172 to 1.272 thousand cells/liter and from 0.12 to 0.54 mg/liter, respectively. Despite structural changes in the phytocenosis (Vislyanskaya et al., 1999; Lakes of Karelia, 2013; Smirnova, 2025), data on phytoplankton growth and Chl *a* concentration in winter testified that the water in the studied area of Lake Onego had an oligotrophic status (Kitaev, 2007) and its quality corresponded to clean water standards (Oksiyuk et al., 1993).

3.4. Zooplankton

In winter, zooplankton consisted mainly of *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Asplanchna priodonta* Gosse, 1850, and species of the genera *Conochilus* and *Synchaeta*. Cladocera *Daphnia* (*D.*) *cristata* (Sars, 1862) and *Bosmina longispina* Leydig, 1860 were noted singly. *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863) copepodites at the older stages were also encountered in diapause in the bottom layers. Adult glacial relict specimens were not found, only *L. macrurus* nauplii at the abundance of nearly 150 ind./m³. As previously shown, *L. macrurus* is found year-round in Lake Onego, reproducing in winter and being one of the main plankton species. Under the ice, nauplii are concentrated in the 0–10 m layer, while adults are mostly distributed below 15 m (Fomina and Syarki, 2022). It is likely that clustering of adult *L. macrurus* are located in the deeper parts of the Kizhi skerries.

Rotifera dominated the under-ice zooplankton of the Kizhi skerries area, which is not typical for the winter community of Lake Onego; Calanoida and Cyclopoida are usually dominant in zooplankton (Kulikova et al., 1997; Syrki and Fomina, 2017). Abundance growth of Rotifera is associated with shallow depths in this area. At shallow-water sites, copepods accounted for 13% of the total abundance and 21% of the total biomass on average, while in deeper parts (depth 9 m) they accounted for 21% and 44%, respectively. For instance, in Petrozavodsk Bay (depth 30 m), copepods accounted

for 91% of the total abundance and 98% of the total biomass (Syrki and Fomina, 2017).

Due to unfavourable conditions in winter (low temperature (Fig. 2), lack of light and food), zooplankton is extremely scarce, its abundance ranged from 0.16 to 1.62 thousand ind./m³ and the biomass – from 0.001 to 0.012 g/m³. According to S.P. Kitaev's (2007) classification based on zooplankton biomass indicators, the trophic level of the study area corresponds to the ultra-oligotrophic type.

3.5. Macrozoobenthos

Our study showed that macrozoobenthos was quite diverse, represented by main benthic invertebrate groups. Five groups of different taxonomic ranks were identified, basically comprised of the forms that are widely distributed in the coastal shallow waters of the lake and in most water bodies of the North-West. The most common and numerous groups registered were Chironomidae larvae (100% occurrence), Oligochaeta (80% occurrence), larvae of amphibious insects – Ephemeroptera (100% occurrence) and Hydracarina, also known as water mites, (50% occurrence). Bivalve molluscs were found in less than half of the samples (30% occurrence). The abundance of macrozoobenthos ranged from 0.04 to 3.62 thousand specimens/m² and biomass varied from 0.2 to 6.1 g/m². The maximum biomass was recorded at stations Z5 and Z3, mainly due to presence of large eurybiontic specimens of *Chironomus plumosus* larvae. According to S.P. Kitaev's classification (2007) based on benthic biomass, the state of the study area varies from α -oligotrophic to β -mesotrophic. It is important to note that amphipod crustaceans were not found. Benthic crustaceans are known to migrate, and the glacial relict *M. affinis* (Lindström 1855) belongs to cold-tolerant oxyphilic species, preferring a temperature range of 6–12 °C and a high oxygen content in the water (80–100 %) (The largest reservoir..., 2015). It is possible that during these studies, the crustacean *M. affinis* migrated to find more favourable environmental conditions.

4. Conclusions

For the first time, a study on the state of the aquatic ecosystem of the Kizhi skerries area of Lake Onego, based on hydrochemical and hydrobiological observations during the ice cover period was conducted. It was found that the water in the Kizhi skerries is characterized by low mineralization and low organic matter concentration. In winter, the average concentration of total phosphorus in water was 7 µg/l, which corresponds to an oligotrophic type. The concentration of iron, manganese and pollutants (oils and synthetic surface-active substances) did not exceed MPC. Thus, water in this part of the Onego Lake is of good quality.

Based on bacterioplankton, phytoplankton, and chlorophyll concentrations, the water quality of the Kizhi skerries in winter corresponds to clean waters. In general, unfavourable conditions in winter (low temperature, lack of light, nutrients and food) form a small

plankton community (bacteria, phytoplankton, zooplankton), which characterises the studied areas of the Kizhi skerries as oligotrophic. However, analysis of the macrozoobenthos communities at deeper stations (Z3 and Z5) allowed us to attribute this basin to β -mesotrophic. The glacial relict *M. affinis* was not found in the macrozoobenthos community.

Acknowledgements

The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation № 23-17-20018, <https://rscf.ru/project/23-17-20018/>, the authorities of the Republic of Karelia and Venture Capital Fund of the Republic of Karelia (VCF RK).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Alekin O.A., Semenov A.D., Skopintsev B.A. 1973. Guide to the chemical analysis of land waters. Leningrad: Gidrometeoizdat. (In Russian)
- Alekseev V.A., Tsalolikhin S.Ya. 2010. Determinator of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 1 Zooplankton. Moscow- Saint-Petersburg: Tovarishhestvo nauchny'x izdaniy KMK Publ. (In Russian)
- Alekseev V.A., Tsalolikhin S.Ya. 2016. Determinator of zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos. Moscow- Saint-Petersburg: Tovarishhestvo nauchny'x izdaniy KMK Publ. (In Russian)
- Benson B.J., Magnuson J.J., Jensen O.P. et al. 2012. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005). *Climatic Change* 112: 299–323.
- Bulletin of Environmental Research for 2004. 2005. In: Protasov Yu.G., Martyanov R.S. (ed.), Petrozavodsk: Kizhi Museum-Reserve. (In Russian)
- Bulletin of Environmental Research for 2012. 2013. In: Martyanov R.S., Ieshko E.P. (ed.), Petrozavodsk: Kizhi Museum-Reserve. (In Russian)
- Determination of photosynthetic pigments in sea waters. 1966. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. France: UNESCO.
- Efremova T.V., Palshin N.I. 2017. Ice phenology and thermal structure of lakes in northwestern Russia during the ice cover period (based on long-term observations). In: *Lakes of Eurasia: problems and solutions: proceedings of the 1st International Conference*. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pp. 222–228. (In Russian)
- Fedorov V.D. 1979. On methods for studying phytoplankton and its activity. Moscow: Nauka. (In Russian)
- Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. 2019. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. *Inland Waters* 9: 130–141. DOI: [10.1080/20442041.2018.1533355](https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355)
- Filatov N.N., Rukhovets L.A., Nazarova L.E. et al. 2014. The impact of climate change on the ecosystems of lakes in the north of European Russia. *Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University* 34: 48–55.
- Fomina Yu.Yu., Syarki M.T. 2022. Life cycle of the copepod *Limnocalanus macrurus* Sars 1863 (Copepoda, Calaniformes, Centropagidae) in Lake Onego. *Zoological Journal* 1 (101): 3–13.
- Fomina Yu.Yu., Sidorova A.I. 2024. Spring zooplankton and zoobenthos in the area of Kizhi Island in Lake Onego. In: 13th Congress of the Hydrobiological Society of the Russian Academy of Sciences, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, the Decade of Science and Technology in Russia, and the 5th anniversary of the Arkhangelsk Branch of the Hydrobiological Society of the Russian Academy of Sciences. Arkhangelsk: KIRA, pp. 168–169. (In Russian)
- Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. 2022. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 17: 100619. DOI: [10.1016/j.enmm.2021.100619](https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619)
- GOST 17.1.04.02.90. 2001. Water. Method for spectrophotometric determination of chlorophyll 'a'. State control of water quality. Moscow: Standards Publishing House. (In Russian)
- Hampton S.E., Moore M.V., Ozersky T. et al. 2015. Heating up a cold subject: prospects for under-ice research in lakes. *Journal of Plankton Research* 37: 277–284.
- Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. In: Kemp P.F., Sherr B.F., Sherr E.B. et al. (Ed.). Washington: Levis Publishers, CRC Press LLC.
- Identification Guide to Freshwater Algae of the USSR. 1951–1986. Moscow, Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, pp. 1–14. (In Russian)
- Jeffrey S.W., Humphrey G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c, and c 2 in higher plants, algae, and natural phytoplankton. *Biochimie und Physiologie der Pflanzen* 167: 191–194.
- Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Efremova T.V. 2021. The reaction of the Onego Lake ecosystem in the spring-summer period to the abnormally high air temperature of the winter of 2019/2020. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series* 6 (85): 888–899.
- Kitaev S.P. 2007. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (In Russian)
- Kopylov A.I., Kosolapov D.B. 2007. Microbiological indicators of eutrophication in freshwater bodies. In: *Bioindication in monitoring freshwater ecosystems: proceedings of the International Conference*. Saint Petersburg. Saint Petersburg: LEMA, pp. 176–181. (In Russian)
- Krambeck C., Krambeck H.J.R., Overbeck J.R. 1981. Microcomputer-assisted biomass determination of plankton bacteria on scanning electron micrographs. *Applied and Environmental Microbiology* 42(1): 142–149. DOI: [10.1128/aem.42.1.142-149.1981](https://doi.org/10.1128/aem.42.1.142-149.1981)
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (1). Bacillariophyceae: Naviculaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1988. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (2). Bacillariophyceae: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (3). Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (4). Bacillariophyceae: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)

- Kulikova T.P., Kustovlyankina H.B., Syarki M.T. 1997. Zooplankton as a component of the Onego Lake ecosystem. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Kuzmin G.V. 1975. Phytoplankton. In: Mordukhai-Boltovskaya F.D. (ed.), *Methods of studying biogeocenoses of inland water bodies*. Moscow: Nauka, pp. 73–84. (in Russian)
- Kuzmin G.V. 1984. *Tables for calculating algae biomass*. Magadan: Publishing House of the Far Eastern Scientific Centre of the USSR Academy of Sciences. (in Russian)
- Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. 1989. *Methods of studying aquatic microorganisms*. Moscow: Nauka. (in Russian)
- Lake Onego. Atlas. 2010. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Lakes of Karelia. 2013. Reference book. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Lozovik P.A. 2013. Geochemical classification of surface waters in the humid zone based on their acid-base equilibrium. *Water Resources* 6 (40): 583–593. DOI: [10.7868/S0321059613060072](https://doi.org/10.7868/S0321059613060072)
- Lozovik P.A., Efremenko N.A. 2017. Analytical, kinetic and computational methods in hydrochemical practice. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya. (in Russian)
- Makarova E.M. 2025. Assessment of water quality in the area of Kizhi Museum-Reserve (Lake Onego) by bacterioplankton indicators in summer of 2023. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 52–67. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-52](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-52)
- Matvienko A.M. 1954. *Golden algae. Identification guide to freshwater algae of the USSR*. Moscow: Soviet Science. (in Russian)
- Methods of hydrobiological research of inland waters. 2024. Yaroslavl: Filigran. (in Russian)
- Oksiyuk O.P., Zhukinsky V.N., Braginsky L.P. et al. 1993. Integrated ecological classification of surface water quality on land. *Gidrobiologicheskij zhurnal* [Hydrobiological Journal] 29(4): 62–76. (In Russian)
- Potayenko Yu.S. 1979. Abundance, biomass, and production of bacterioplankton. Experimental and field studies of the biological basis of lake productivity. Leningrad: Nauka, pp. 80–102. (In Russian)
- Sabylina A.V., Ryzhakov A.V. 2018. Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onego. *Water Resources* 2 (45): 179–187. DOI: [10.7868/S0321059618020074](https://doi.org/10.7868/S0321059618020074)
- Smirnova V.S. 2025. Trophic state of the Kizhi skerries area of Lake Onego and water quality assessment based on summer phytoplankton indicators. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 30–51. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-30](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-30)
- Syrki M.T., Fomina Yu.Yu. 2017. Zooplankton of Petrozavodsk Bay, Lake Onego, during the ice period. *Scientific Notes of Petrozavodsk State University* [Scientific notes of Petrozavodsk State University] 6 (167): 90–95. (In Russian)
- The largest reservoir lakes in the north-west of European Russia: current status and ecosystem changes under climatic and anthropogenic influences. 2015. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.
- Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas*. Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy. Helsinki: Forssa.
- Vislyanskaya I.G., Kulikova T.P., Polyakova T.N. et al. 1999. Current state of hydrobiocenoses of the Kizhiskerries area of Lake Onego. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series B. "Biogeography of Karelia"*. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS 1: 113–120. (In Russian)
- Water quality standards of water bodies of fishery significance, including standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fisheries significance. 2016. Order No. 552 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation. (in Russian)

Состояние водной экосистемы по гидрохимическим и гидробиологическим показателям района Кижские шхеры Онежского озера в подледный период



Сидорова А.И.^{1*}, Зобкова М.В.¹, Фомина Ю.Ю.^{1,2},
Сластина Ю.Л.¹, Макарова Е.М.¹, Сидоров С.М.^{1,3}

¹ Институт водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, г. Петрозаводск, пр. Александра Невского, 50, Республика Карелия, 185030, Россия

² Карельский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», г. Петрозаводск, ул. Анохина, дом 29А, помещение 6-Н, Республика Карелия, 185035, Россия

³ Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, Республика Карелия, 185910, Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые в подледный период проведены комплексные исследования по гидрохимическим и гидробиологическим показателям в районе о. Кижь Онежского озера. В зимний период концентрация общего фосфора составляла в среднем 7 мкг/л, что соответствует олиготрофным типам вод. Содержание железа, марганца и загрязняющих веществ (нефтепродукты и СПАВ) не превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Полученные результаты обработки данных гидрохимических показателей свидетельствуют о хорошем качестве воды в Кижских шхерах. По уровню развития гидробиологических показателей (бактерио-, фито-, зоопланктон и макрозообентоса) состояние района исследования характеризуется как олиготрофное с элементами β-мезотрофии.

Ключевые слова: химические показатели, бактериопланктон, хлорофилл *a*, фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос

Для цитирования: Сидорова А.И., Зобкова М.В., Фомина Ю.Ю., Сластина Ю.Л., Макарова Е.М., Сидоров С.М. Состояние водной экосистемы по гидрохимическим и гидробиологическим показателям района Кижские шхеры Онежского озера в подледный период // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 515-529. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-515

1. Введение

Озера в Северном полушарии в последние десятилетия имеют общие тенденции к более позднему замерзанию (на 1.6 дня за 10 лет) и раннему разрушению ледяного покрова (1.9 дня за 10 лет), а также сокращению продолжительности ледостава на 4.3 дня за десятилетие (Benson et al., 2012). Так, в Ладожском озере наблюдается тенденция установления ледяного покрова позже на 1–6 дней, а вскрытия – на 14 дней раньше. В Онежском озере продолжительность ледового покрова за 60-летний период наблюдения (1955–2015 гг.) уменьшилась на 50 дней. Также отмечены тренды на сокращение ледоставного периода для водоемов республики Карелия: Сегозеро, Топозеро, Выгозеро, Сямозеро, Водлозеро, Ругозеро, Тулмозеро (Филатов и др., 2014; Ефремова и Пальшин, 2017; Filatov et al., 2019). Такие изменения термического режима озера могут вызвать сдвиги важных фенологических про-

цессов, таких как весенняя сукцессия планктона, а также привести к изменениям в трофической сети и потоках углерода в экосистеме (Калинкина и др., 2021; Hampton et al., 2015). Для отслеживания изменений больших озер важной задачей является проведение междисциплинарных исследований зимнего состояния экосистемы.

Онежское озеро расположено в зоне Европейского севера России и является вторым по величине пресноводным озером Европы. В естественном состоянии площадь зеркала составляет 9720 км², из которых 250 км² приходится на 1500 островов. Онежское озеро относится к крупным холодноводным водоемам умеренной зоны. Озеро покрыто льдом с декабря (иногда с января) до середины мая – в течение 120–164 дней (Онежское озеро..., 2010).

К настоящему времени гидрохимические и гидробиологические показатели (бактериопланктон, фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос)

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bolt-nastya@yandex.ru (А.И. Сидорова)

Поступила: 14 июня 2025; **Принята:** 31 июля 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



в районе Кижских шхер Онежского озера в вегетационный период достаточно подробно изучены (Вислянская и др., 1999; Фомина и Сидорова, 2024; Galakhina et al., 2022; Makarova, 2025; Smirnova, 2025 и др.), однако в зимний период исследований ранее не проводилось. Кроме того, подледное состояние водных сообществ является неотъемлемой частью годового цикла, особенно важное значение зимний период имеет для видов, которые размножаются подо льдом, для таких, как гляциально-морской реликт *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863 и гляциальный реликт *Monoporeia affinis* (Lindström, 1855).

Цель работы – изучить состояние экосистемы в районе Кижских шхер Онежского озера в зимний период.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Отбор проб

Кижский архипелаг расположен в северной части Онежского озера и состоит из множества островов, наиболее известным из которых является остров Киж. Данный район озера отличается небольшими глубинами (до 10 м), хорошим прогревом воды, сравнительно замедленным водообменом, а также интенсивным судоходством в результате туристической деятельности.

Пробы воды были отобраны в феврале 2025 г. на 10 станциях в районе о. Киж (Рис. 1). В зимний период, в условиях замедленного водообмена, в придонном слое воды, может происходить накопление загрязняющих веществ. Исходя из этого, на станциях Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 и ZOT с глубинами 5.0–9.8 м отбор проб воды осуществляли как с поверхностного, так и с придонного горизонтов, а на мелководных станциях ZW1, ZW3, ZW4, ZW5, где глубины не превышали 2.5 м, – только с поверхностного. Ряд точек отбора был выбран из расчета их близкого расположения к потенциальным источникам антропогенной нагрузки. Так, станции ZW1, ZW3, ZW4, ZW5 находятся неподалеку от мест сброса очищенных сточных вод из локальных очистных сооружений, а станции Z2, Z4 и ZOT – в зоне интенсивного судоходства. Мониторинговые станции представлены серым илом в шхерном районе водоема. Отбор проб бактерио- и фитопланктона осуществлялись с помощью батомера Рутнера, отбор зоопланктона производили с помощью сети Джеди (диаметр 18.5 см; диаметр пор 100 мкм). Количественные пробы бентоса отбирали дночерпателем автоматическим коробчатым (площадью 0.025 м²) на каждой станции по две пробы, промывали через сито №23 и фиксировали 4% формалином. На каждой станции с помощью датчика CastAway-CTD велось измерение температуры воды, которая изменялась от 0 до 2.5 °C (Рис. 2).

2.2. Гидрохимические показатели

В пробах воды велось определение компонентов ионного состава (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} ,

HCO_3^-), содержания органического вещества (органического углерода ($\text{C}_{\text{орг}}$), химическое потребление кислорода (ХПК), перманганатная окисляемость (ПО), цветность, биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК_5), биогенных (общего фосфора ($\text{P}_{\text{общ}}$), минерального фосфора ($\text{P}_{\text{мин}}$), азота общего ($\text{N}_{\text{общ}}$), органического ($\text{N}_{\text{орг}}$) и его минеральных форм (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-)) и литофильных ($\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn , Si) элементов, газового состава (CO_2 , O_2), загрязняющих веществ – нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), а также взвешенного вещества, величин электропроводности (κ) и pH воды. Анализ химического состава воды осуществляли по стандартным методикам (Лозовик и Ефременко, 2017).

2.3. Методы микробиологического анализа

Общую численность бактерий, их биомассу и средние объемы клеток определяли в 5 подледных пробах поверхностного горизонта.

Общую численность бактерий определяли методом прямого счета на черных поликарбонатных трековых мембранах Whatman ($D_{\text{пор}} = 0.2$ мкм) на люминесцентном микроскопе МИКМЕД-2 (увеличение $\times 1600$) с предварительным окрашиванием клеток акридиновым оранжевым (Handbook..., 1993). Размеры клеток измеряли при помощи компьютерной программы MultiMedia Catalog (MMC), обладающей возможностью калибровки шкалы. Средний объем клеток вычисляли как объем подходящих им по форме стереометрических фигур (Krambeck et al., 1981; Кузнецов и Дубинина, 1989). Биомассу бактерий рассчитывали как произведение среднего объема бактериальных клеток и общей численности бактерий (Кузнецов и Дубинина, 1989).

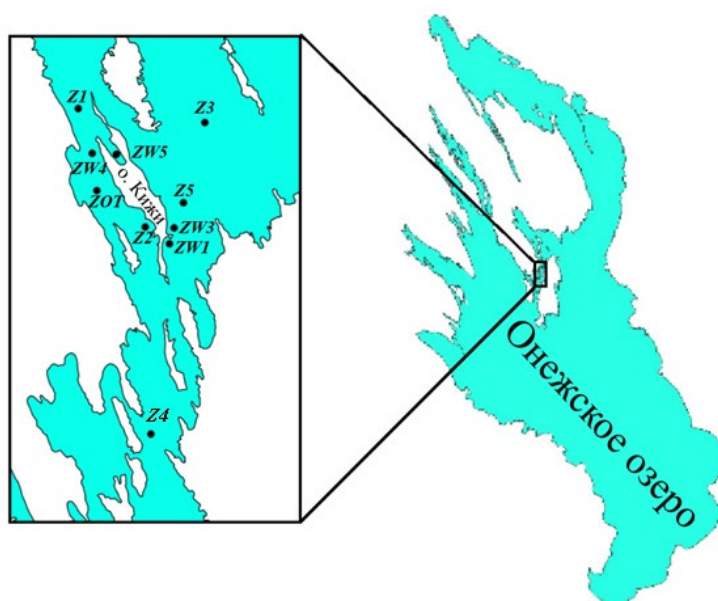


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб в подледный период 2025 года.

Класс качества воды оценивали согласно комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши по показателям общей численности бактерий (Оксиук и др., 1993). Для определения трофического статуса воды Кижских шхер по общей численности бактерий, их среднему объему и биомассе использовали классификацию (Копылов и Косолапов, 2007).

2.4. Определение хлорофилла а и фитопланктона

Определение пигментов проводили в смешанном 90% ацетоновом экстракте стандартным спектрофотометрическим методом, изложенным в руководствах ЮНЕСКО (Determination..., 1966) и принятым в России в качестве Госстандарта (ГОСТ, 2001). Предварительно была произведена концентрация проб воды, объемом до 1 литра, вакуумным насосом методом прямой фильтрации на мембранные фильтры Владипор МФАС-ОС-3 с диаметром пор 0.8 мкм. Оптическая плотность экстрактов измерялась на спектрофотометре «Super Aquarius Cecil SE 9500 series 9000». Концентрацию хлорофилла а (Хл а) рассчитывали по уравнениям, приведенным в руководстве ЮНЕСКО (Determination..., 1966) и модифицированными Джеффри и Хамфри (Jeffrey and Humphrey, 1975).

Пробы воды объемом 500 мл фиксировали 10 мл 40%-ого формалина, затем концентрировали на мембранных фильтрах (диаметр пор 0.8 мкм) до объема 5 мл (Кузьмин, 1975; Федоров, 1979; Методы..., 2024). Камеральная обработка фитопланктона, проводившаяся в камере Нажотта объемом 0.01 мл с помощью микроскопа Микмед-6 с иммерсионным объективом при увеличениях от 400 до 1000 раз, включала подсчет численности и индивидуальных объемов клеток водорослей. Биомасса вычислялась счетно-объемным методом из расчетов по формулам объема сходных геометрических фигур (Кузьмин, 1984; Tikkanen, 1986). Таксономическую идентификацию фитопланктона проводили по определителям (Определитель пресноводных..., 1951–1986; Krammer and Lange-Bertalot, 1986; 1988; 1991a; b; Матвиенко, 1954; Tikkanen, 1986). К категории доминирующих видов относили виды с численностью и/или биомассой более 10%. Было рассчитано удельное богатство (п) – число таксонов рангом ниже рода в единице объема воды (в пробе).

Оценка трофического статуса исследованного района Онежского озера по содержанию Хл а и уровню биомассы фитопланктона была проведена по классификации, предложенной С.П. Китаевым (2007), зону сапробности воды определяли по (Оксиук и др., 1993).

2.5. Определение зоопланктона

Учет Copepoda производился по размерно-возрастным группам: младшие копеподиты (1–3 стадии), старшие копеподиты (4–5 стадии), и по соотношению полов: самцы, самки, самки с яйцами.

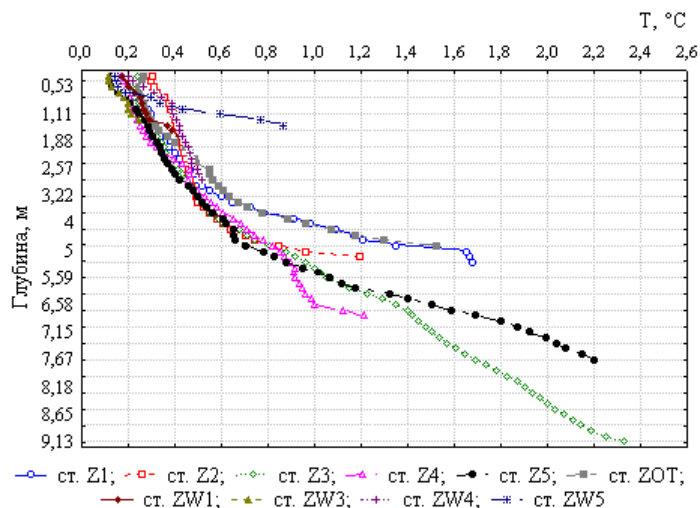


Рис.2. Температура воды на исследуемых станциях (Z1–Z5, ZOT, ZW1, ZW3–ZW5) в районе Кижских шхер Онежского озера в подледный период 2025 года.

Науплиусы каляноид и циклопид, кроме *L. macrurus*, не идентифицированные до вида, объединялись в две группы и делились по размерам (мелкие, средние и крупные). Применялась стандартная методика для сетного отбора и камеральной обработки проб (Методы..., 2024). Идентификация зоопланктона осуществлялась по (Алексеев и Цалолихин, 2010).

2.6. Определение макрозообентоса

Камеральная обработка включала разбор проб, согласно стандартным методикам сбора и первичной обработки материала (Методы..., 2024). Выбор организмов из грунта проводился с использованием микроскопа стереоскопического МСП-2 вариант 2 в модифицированной камере Богорова, специально изготовленной для разбора бентосных проб под микроскопом. Взвешивание организмов проводили в сыром виде с точностью 0.0001 г. Разобраный и взвешенный материал фиксировался 70% этанолом. Таксономическая идентификация проводилась с использованием определителя (Алексеев и Цалолихин, 2016).

2.7. Статистический анализ

Выявление различий в содержании химических показателей между отдельными станциями Кижских шхер осуществляли с помощью независимого теста ANOVA с пороговым критерием статистической значимости (p), равным 0.01. При этом для статистической обработки данных использовалось свободно распространяемое ПО Sofastatistics 1.4.6 (<http://www.sofastatistics.com>). Для сравнения выборок гидробиологических показателей применяли непараметрический анализ Манна – Уитни. Статистическая обработка гидробиологических данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Гидрохимические показатели

По всем рассмотренным гидрохимическим показателям не было выявлено статистически значимой разницы между исследуемыми станциями (тест ANOVA, $p > 0.01$). Кроме того, разницы в содержании гидрохимических показателей в поверхностном и придонном слоях воды также зафиксировано не было, что указывает на отсутствие накопления загрязняющих веществ в придонном горизонте и, как следствие, может свидетельствовать об отсутствии антропогенной нагрузки в данном районе озера в зимний период. Таким образом, поскольку значения всех показателей были близки на всех станциях и глубинах, то при дальнейшем описании полученных результатов приводятся их средние значения с указанием стандартного отклонения.

В целом вода в Онежском озере является слабо минерализованной. В Кижских шхерах сумма ионов составляла в среднем 39.5 ± 0.7 мг/л, а ионный состав, выраженный в %-экв., был следующим:

$$\frac{Ca^{2+}(50)Mg^{2+}(31)Na^{+}(16)K^{+}(2.8)}{HCO_3^{-}(62)A_{орг}^{-}(14.0)SO_4^{2-}(14)Cl^{-}(7.4)NO_3^{-}(1.9)}$$

Согласно классификации О.А. Алекина (1973) воды относились к гидрокарбонатному классу, группе Са, по щелочности и pH (Лозовик, 2013) они характеризовались как среднещелочностные нейтральные слабощелочные. Содержание кислорода варьировало в пределах 10.4–13.5 мг/л, углекислого газа – 2.4–7.5 мг/л. Насыщение воды кислородом было достаточно высоким и составляло 71–92%.

Содержание общего и минерального фосфора было низким (в среднем 7 ± 1 и 1 ± 1 мкг/л соответственно), что согласно геохимической классификации (Лозовик, 2013) соответствовало олиготрофному типу вод. Однако стоит отметить, что в вегетационный период в Кижских шхерах содержание $P_{общ}$ выше (Бюллетень..., 2005; 2013; Galakhina et al., 2022), что, по-видимому, связано с ростом вклада взвешенной формы фосфора в его общее содержание за счет постоянного взмучивания донных осадков от интенсивной транспортной нагрузки. Это подтверждается повышенным содержанием взвешенных веществ в период открытой воды 2.1 ± 1.0 мг/л (Galakhina et al., 2022). Зимой, по результатам текущего исследования, их концентрация составляла в среднем 0.3 ± 0.4 мг/л.

В период ледостава концентрация общего азота составляла в среднем 0.37 ± 0.02 мг/л, а нитратов – 0.16 ± 0.02 мг/л, что значительно выше, чем в другие сезоны (Рис. 3). Это является закономерным, поскольку в вегетационный период в результате активного потребления NO_3^- фитопланктоном и бактериями их концентрация в Онежском озере постепенно снижается от весны к осени (Сабылина и Рыжаков, 2018). Стоит отметить, что в составе общего азота превалирует его органическая форма (Рис. 3), что в целом характерно для водных объектов Карелии. Содержание кремния в воде составляло в среднем 0.67 ± 0.13 мг/л. в

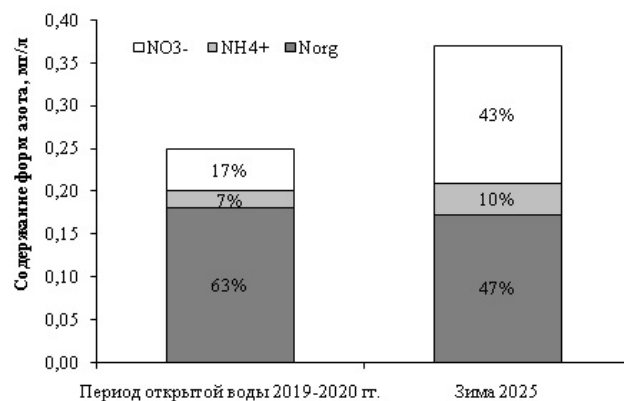


Рис.3. Распределение форм азота в воде Кижских шхер Онежского озера.

период открытой воды 2019–2020 гг. (Galakhina et al., 2022) и зимой 2025 г.

Содержание органического вещества в воде Кижских шхер было низким и слабо отличалось на различных станциях, что подтверждается как прямым определением $C_{орг}$ (в среднем 6.5 ± 0.2 мг/л), так и по косвенным показателям (цветность – 33 ± 3 град., ХПК – 18.4 ± 0.9 мгО/л, ПО – 6.7 ± 0.6 мгО/л). Исходя из этого, воды исследуемого района озера согласно геохимической классификации (Лозовик, 2013) относились к олигогумусным. Значения БПК₅ варьировали в пределах 0.10–0.61 мг O_2 /л, что характерно для зимнего периода в условиях практически полного отсутствия продуцирования легкоокисляемого органического вещества. Это также свидетельствует об отсутствии антропогенной нагрузки в данном районе озера.

Концентрации железа и марганца в воде Кижских шхер зимой составляли в среднем 0.07 ± 0.02 и 0.01 ± 0.005 мг/л соответственно, что не превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов (Нормативы качества..., 2016). Повышенные концентрации этих металлов встречаются в период открытой воды и, как и в случае с фосфором, это может быть обусловлено взвешенной их формой за счет взмучивания донных осадков, вызванных интенсивным судоходством в этом районе озера. Содержание нефтепродуктов и СПАВ также не превышало ПДК, в среднем на них приходилось 0.04 ± 0.03 и 0.01 ± 0.01 мг/л соответственно. В случае нефтепродуктов это связано с отсутствием транспортной нагрузки в период ледостава.

3.2. Бактериопланктон

Бактериопланктон распределен равномерно в подледном слое воды Кижских шхер. Общая численность бактерий, их биомасса и средние объемы клеток характеризуются небольшими величинами (Таблица 1).

Отмечено, что в подледный период средние объемы клеток и общая численность бактерий были вдвое меньше, а биомасса бактерий – в 4 раза меньше, чем в летний период (Makarova, 2025). Непараметрический анализ с применением U-критерия Манна – Уитни показал статистически зна-

чимые ($p < 0.05$) различия между летними и зимними показателями общей численности бактерий, бактериальной биомассы и среднего объема клеток. Это связано, главным образом, с ограничением поступления органических веществ с прибрежных территорий. Известно, что объем клеток, а следовательно, и биомасса, зависят от наличия органических веществ и биогенных элементов (Потаенко, 1979), которые в зимний период снижают свою концентрацию. Также ряд факторов, таких как низкие температуры воды, слабое перемешивание водных масс и отсутствие прямого влияния антропогенного фактора, ограничивают развитие бактерий в зимний период.

Класс качества воды Кижских шхер в подледном горизонте соответствует чистым водам. Согласно (Копылов и Косолапов, 2007) участок акватории возле о. Киж по средним значениям объема клеток, их биомассе и численности характеризуется как олиготрофный.

3.3. Хлорофилл *a* и фитопланктон

Результаты исследования показали, что в феврале 2025 г. содержание Хл *a* в подледной воде района Кижских шхер Онежского озера изменялось от 0.85 до 0.33 мкг/л в поверхностном горизонте и от 0.42 до 0.19 мкг/л в придонном. Наибольшее значение обнаружено на станции Z1, а наименьшее на станции ZW1. На всех станциях наблюдения, где отбор проб производился на нескольких горизонтах, наблюдалось уменьшение концентрации пигмента от поверхности ко дну. Непараметрический анализ с применением U-критерия Манна – Уитни показал статистически значимые ($p < 0.05$) различия между показателями подледного (поверхностного) и придонного горизонтов. На основании сопоставления данных по Хл *a* и фитопланктону такая разница между горизонтами может быть обусловлена началом вегетации фитопланктона. Среднее значение Хл *a* в подледный период составило 0.49 ± 0.21 мкг/л, что значительно ниже чем полученные значения в периоды активной вегетации фитопланктона – в среднем 2.7 мкг/л с 1965 по 2008 гг. (Озера Карелии, 2013).

В зимний период 2025 г. в воде подо льдом было обнаружено 36 видов и внутривидовых таксонов водорослей из 6 систематических групп. По численности и биомассе в основном преобладали диатомовые, преимущественно *Aulacoseira islandica* (O. Müll.) Sim., но на некоторых пунктах наблюдения отмечено развитие цианобактерий и динофитовых. На станции Z2 возле причала водного транспорта по численности доминировали цианобактерии *Aphanocapsa elachista* var. *Elachista* W. Et G. S. West. На станции Z4 доля цианобактерий *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. составила 90% численности, но основной вклад в формирование биомассы (83%) принадлежит динофитовым *Parvodinium inconspicuum* (Lemm.) Carty. и *Ceratium hirundinella* (Müll.) Duj. На всех станциях наблюдения, несмотря на интенсивную вегетацию доминанта оли-

Таблица 1. Пространственное распределение показателей общей численности бактерий (ОЧБ), бактериальной биомассы (ББ) и среднего объема клеток (V_{cp}) в подледном слое воды Кижских шхер Онежского озера

Станции	ОЧБ, млн кл. /мл	V_{cp} , мкм ³	ББ, мг/л
Z1	1.59	0.05	0.061
Z2	1.4	0.046	0.09
Z3	1.21	0.054	0.088
Z4	1.3	0.044	0.103
Z5	1.49	0.044	0.071

готрофного периода *Aulacoseira islandica*, отмечено развитие цианобактерий (*Anathece minutissima* Kom., Kašt. & Jezber. (2011), *Oscillatoria planctonica* Wolosz., *Aphanizomenon flos-aquae* (Linne) Ralfs), а также хлорококковых водорослей. Значения численности и биомассы подледного фитопланктона находились в пределах от 172 до 1272 тыс. кл/л и от 0.12 до 0.54 мг/л соответственно. Несмотря на изменение структуры фитоценоза в сравнении с более ранними наблюдениями (Вислянская и др., 1999; Озера Карелии, 2013; Smirnova, 2025), по уровню развития фитопланктона и концентрации Хл *a* в зимний период исследований вода изучаемого района Онежского озера имеет олиготрофный статус (Китаев, 2007), качество воды соответствует чистым водам (Оксиук и др., 1993).

3.4. Зоопланктон

Зимой основу зоопланктона составляли *Eudiaptomus gracilis* (Sars, 1863), *Kellicottia longispina* (Kellicott, 1879), *Asplanchna apriodonta* Gosse, 1850, виды родов *Conochilus*, *Synchaeta*. Ветвистоусые рачки встречались единично – *Daphnia* (D.) *cristata* (Sars, 1862) и *Bosmina longispina* Leydig, 1860. Также были отмечены старшие копепоиды *Thermocyclops oithonoides* (Sars 1863) в диапаузе в придонных слоях. Взрослые особи гляциально-морского реликта *Limnocalanus macrurus* Sars, 1863 не обнаружены, отмечены только науплиусы рачка, численность которых достигала 150 экз./м³. Ранее было показано, что в Онежском озере *L. macrurus* встречается круглогодично, зимой размножается и является одним из основных видов планктона. Подо льдом науплиусы сосредоточены в слое 0–10 м, взрослые рачки концентрируются в слое ниже 15 м (Фомина и Сярки, 2022). Вероятно, скопления взрослых особей *L. macrurus* располагаются в более глубоких частях района Кижские шхеры.

В подледном зоопланктоне района Кижских шхер преобладали коловратки, что не характерно для зимнего сообщества Онежского озера, обычно состоящего из каланоид и -циклопоид (Куликова и др., 1997; Сярки и Фомина, 2017). Увеличение количества коловраток связано с небольшими глубинами в районе исследования. Так, на мелководных станциях доля веслоногих рачков составляла в среднем 13% по численности и 21% по биомассе,

на более глубокой станции (глубина 9 м) – 21% и 44% соответственно. Например, на Петрозаводской губе (глубина 30 м) численность веслоногих рачков составляла 91%, биомасса – 98% (Сярки и Фомина, 2017).

В связи с неблагоприятными условиями для жизни планктона в зимний период (низкая температура (Рис. 2), отсутствие света и корма) количество зоопланктона крайне малочисленно. Численность варьировала от 0.16 до 1.62 тыс. экз./м³, а биомасса – от 0.001 до 0.012 г/м³. Согласно классификации С.П. Китаева (2007) по показателям биомассы зоопланктона, уровень трофии района исследования соответствует ультраолиготрофному.

3.5. Макрозообентос

Результаты исследования показали, что макрозообентос достаточно разнообразен и представлен основными группами донных беспозвоночных. В составе идентифицировано 5 групп различного таксономического ранга, основу которых составляют формы, широко распространенные как в прибрежном мелководье озера в целом, так и в большинстве водоемов Северо-Запада. Наиболее распространенными и многочисленными группами в течение периода исследования являлись личинки хирономид Chironomidae (100% встречаемости), малощетинковые черви Oligochaeta (80% встречаемости) и личинки амфибиотических насекомых – поденки Ephemeroptera (100% встречаемости) и водяные клещи Hydracarina (50% встречаемости). В менее чем в половине проб были обнаружены двусторчатые моллюски Bivalvia (30% встречаемости). Численность макрозообентоса варьировала от 0.04 до 3.62 тыс. экз./м² и биомасса от 0.2 до 6.1 г/м². Максимальная биомасса отмечена на станции Z5 и Z3, в основном за счет крупных эврибионтных экземпляров личинок хирономид *Chironomus plumosus*. По классификации С.П. Китаева (2007) на основе биомассы бентоса, состояние района исследования характеризуется от α-олиготрофного до β-мезотрофного. Важно отметить, что ракообразные Amphipoda не были обнаружены. Бокоплавы способны к миграциям, гляциальный реликт *Monoporeia affinis* (Lindström 1855) относится к холодолюбивым оксифильным видам, оптимумом для которых являются температура 6–12 °C и высокое содержание кислорода в воде (80–100 %) (Крупнейшие..., 2015). Вероятно, во время данных исследований рачок *M. affinis* мигрировал в оптимальные условия существования.

4. Выводы

Впервые проведено исследование состояния водной экосистемы района Кижских шхер Онежского озера по гидрохимическим и гидробиологическим показателям в подледный период. В результате установлено, что вода в шхерах характеризуется низкой минерализацией и невысоким содержанием органических веществ. В зимний

период концентрация фосфора общего составляла в среднем 7 мкг/л, что соответствует олиготрофным типам вод. Содержание железа, марганца и загрязняющих веществ (нефтепродукты и СПАВ) не превышало ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о хорошем качестве воды в исследованном районе Онежского озера.

По показателям бактерио- и фитопланктона и содержанию хлорофилла *a* качество воды Кижских шхер в зимний период соответствует чистым водам. В целом, неблагоприятные условия в зимний период (низкая температура, отсутствие света, питательных веществ и корма) формируют малочисленное планктонное сообщество (бактерио-, фито-, зоопланктона), что характеризует исследуемый участок района Кижских шхер как олиготрофный. Однако сообщества макрозообентоса на более глубоких станциях Z3 и Z5 свидетельствуют о β-мезотрофии. В сообществе макрозообентоса гляциальный реликт *Monoporeia affinis* обнаружен не был.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-20018, <https://rscf.ru/project/23-17-20018/>, проводимого совместно с органами власти Республики Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. 1973. Руководство по химическому анализу вод суши. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Алексеев В.А., Цалолихин С.Я. 2010. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т.1. Зоопланктон. Москва– Санкт-Петербург: Товарищество научных изданий КМК.
- Алексеев В.А., Цалолихин С.Я. 2016. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т.2. Зообентос. Москва– Санкт-Петербург: Товарищество научных изданий КМК.
- Бюллетень экологических исследований за 2004 г. 2005. В: Протасов Ю.Г., Мартыанов Р.С. (ред.). Петрозаводск: Музей-заповедник «Кижь».
- Бюллетень экологических исследований за 2012 год. 2013. В: Мартыанов Р.С., Иешко Е.П. (ред.). Петрозаводск: Музей-заповедник «Кижь».
- Вислянская И.Г., Куликова Т.П., Полякова Т.Н. и др. 1999. Современное состояние гидробиоценозов района Кижских шхер Онежского озера. Труды КарНЦ РАН. Серия Б. «Биогеография Карелии» 1: 113–120.
- ГОСТ 17.1.04.02.90. 2001. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «a». Государственный контроль качества воды. Москва: Изд-во стандартов.
- Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. 2017. Ледовая фенология и термическая структура озер северо-запада России в

период ледостава (по данным многолетних наблюдений). В: Озера Евразии: проблемы и пути их решения: материалы 1-й Международной конференции. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, С. 222–228.

Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Ефремова Т.В. и др. 2021. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов. Известия Российской академии наук. Серия географическая 6 (85): 888–899.

Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Копылов А.И., Косолапов Д.Б. 2007. Микробиологические индикаторы эвтрофирования пресных водоемов. В: Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: сборник трудов Междунар. конф. Санкт-Петербург. Санкт-Петербург: ЛЕМА, С. 176–181.

Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. 2015. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. 1989. Методы изучения водных микроорганизмов. Москва: Наука.

Кузьмин Г.В. 1984. Таблицы для вычисления биомассы водорослей. Магадан: Изд-во ДВНЦ АН СССР.

Кузьмин Г.В. 1975. Фитопланктон. В: Ф.Д. Мордухай-Болтовской (ред.). Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. Москва: Наука, С. 73–84.

Куликова Т.П., Кустовлянкина Н.Б., Сярки М.Т. 1997. Зоопланктон как компонент экосистемы Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

Лозовик П.А. 2013. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия. Водные ресурсы 6(40): 583–593. DOI: [10.7868/S0321059613060072](https://doi.org/10.7868/S0321059613060072)

Лозовик П.А., Ефременко Н.А. 2017. Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. Санкт-Петербург: Нестор-История.

Матвиенко А.М. 1954. Золотистые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Москва: Советская наука.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. 2024. Ярославль: Филигрань.

Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. 2016. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации № 552.

Озера Карелии. Справочник. 2013. Петрозаводск: КарНЦРАН.

Оксиюк О.П., Жукинский В.Н., Брагинский Л.П. и др. 1993. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши. Гидробиологический журнал 29(4): 62–76.

Онежское озеро. Атлас. 2010. Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Определитель пресноводных водорослей СССР. 1951–1986. Москва, Ленинград: АН СССР, Т. 1–14.

Потаенко Ю.С. 1979. Численность, биомасса и продукция бактериопланктона. Экспериментальные и полевые исследования биологических основ продуктивности озер. Ленинград: Наука, С. 80–102.

Сабылина А.В., Рыжаков А.В. 2018. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера. Водные ресурсы 2 (45): 179–187. DOI: [10.7868/S0321059618020074](https://doi.org/10.7868/S0321059618020074)

Сярки М.Т., Фомина Ю.Ю. 2017. Зоопланктон Петрозаводской губы Онежского озера в подледный

период. Ученые записки Петрозаводского государственного университета 6 (167): 90–95.

Федоров В.Д. 1979. О методах изучения фитопланктона и его активности. Москва: Наука.

Филатов Н.Н., Руховец Л.А., Назарова Л.Е. и др. 2014. Влияние изменения климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России. Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета 34: 48–55.

Фомина Ю.Ю., Сидорова А.И. 2024. Весенний зоопланктон и зообентос в районе о. Кизи в Онежском озере. В: 13-й съезд Гидробиологического общества при Российской академии наук, посвященный 300-летию Российской академии наук, Десятилетию науки и технологий в России и 5-летию Архангельского отделения ГБО при РАН. Архангельск: КИРА, С. 168–169

Фомина Ю.Ю., Сярки М.Т. 2022. Жизненный цикл рачка *Limnocalanus macrurus* Sars 1863 (Copepoda, Calaniformes, Centropagidae) в Онежском озере. Зоологический журнал 1 (101): 3–13.

Benson B.J., Magnuson J.J., Jensen O.P. et al. 2012. Extreme events, trends, and variability in Northern Hemisphere lake-ice phenology (1855–2005). Climatic Change 112: 299–323.

Determination of photosynthetic pigments in sea waters. 1966. Report of SCOR/UNESCO Working Group 17. France: UNESCO.

Filatov N., Baklagin V., Efremova T. et al. 2019. Climate change impacts on the watersheds of Lakes Onego and Ladoga from remote sensing and in situ data. Inland Waters 9: 130–141. DOI: [10.1080/20442041.2018.1533355](https://doi.org/10.1080/20442041.2018.1533355)

Galakhina N., Zobkov M., Zobkova M. 2022. Current chemistry of Lake Onego and its spatial and temporal changes for the last three decades with special reference to nutrient concentrations. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management 17: 100619. DOI: [10.1016/j.enmm.2021.100619](https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100619)

Hampton S.E., Moore M.V., Ozersky T. et al. 2015. Heating up a cold subject: prospects for under-ice research in lakes. Journal of Plankton Research 37: 277–284.

Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. In: Kemp P.F., Sherr B.F., Sherr E.B. et al. (Ed.). Washington: Lewis Publishers, CRC Press LLC.

Jeffrey S.W., Humphrey G.F. 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c, and c₂ in higher plants, algae, and natural phytoplankton. Biochemie und Physiologie der Pflanzen 167: 191–194.

Krambeck C., Krambeck H.J.R., Overbeck J.R. 1981. Microcomputer-assisted biomass determination of plankton bacteria on scanning electron micrographs. Applied and Environmental Microbiology 42(1): 142–149. DOI: [10.1128/aem.42.1.142-149.1981](https://doi.org/10.1128/aem.42.1.142-149.1981)

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (1). Bacillariophyceae: Naviculaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1988. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (2). Bacillariophyceae: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (3). Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (4). Bacillariophyceae: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart – Jena, Germany. (In German)

Makarova E.M. 2025. Assessment of water quality in the area of Kizhi Museum-Reserve (Lake Onego) by bacterioplankton indicators in summer of 2023. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 52–67. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-52](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-52)

Smirnova V.S. 2025. Trophic state of the Kizhi skerries area of Lake Onego and water quality assessment based on summer phytoplankton indicators. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 30–51. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-30](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-30)

Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas*. Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy. Helsinki: Forssa.