

Assessment of water quality in the area of Kizhi Museum-Reserve (Lake Onego) by bacterioplankton indicators in summer of 2023

Makarova E.M.*

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Aleksandra Nevskogo pr. 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. In summer 2023 the size and morphological structure of bacterioplankton, quantitative indicators of ecological-trophic groups of bacteria and total coliform bacteria were determined in the area of Kizhi Island a water body of Lake Onego. The morphological structure of the cells was dominated by bacilliform bacteria, indicating the presence of easily mineralizable organic matter (OM). The total bacteria abundance, heterotrophic and saprophytic groups of bacterioplankton confirmed the increased content of easily mineralizable OM in the area of Kizhi skerries. The development of phenol-oxidizing and hydrocarbon-oxidizing bacteria revealed water pollution with phenolic compounds and oil products. High indicators of total coliform bacteria indicated the presence of opportunistic microorganisms, the number of which almost everywhere exceeded the norms for waterbodies of recreational use. The most polluted area of Kizhi skerries is the western part, characterized by active shipping and low water exchange.

Keywords: Kizhi Island, bacterioplankton, size-morphological structure, abundance of ecological-trophic groups, total coliform bacteria, water quality assessment

For citation: Makarova E.M. Assessment of water quality in the area of Kizhi Museum-Reserve (Lake Onego) by bacterioplankton indicators in summer of 2023 // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - P. 52-67. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-52

1. Introduction

The Kizhi State Nature Reserve is a specially protected natural territory of federal significance, with an area of 50,000 ha (State Report..., 2023). The State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve "Kizhi" unites 68 architectural monuments on Kizhi Island. The pearl of the island is undoubtedly the ensemble of the Kizhi Pogost. (Lake Onego..., 2010) (Fig. 1) which became one of the first three Russian sites on UNESCO World Cultural Heritage List in 1990.

In 2022, more than 360 thousand tourists from Russia and foreign countries visited the Kizhi Museum-Reserve. The lake water area in area the Kizhi skerries experiences a large anthropogenic load due to a water transportation, and also serves as a receiver of domestic sewage from the territory of the museum-reserve and runoff from agricultural lands (Protasov, 1999; Report..., 2023).

The aquatic community of Kizhi skerries are formed under the influence of ecological conditions,

which are determined by the landscape features of the area that distinguish it from other parts of Lake Onego. Biota development occurs here under conditions of rapidly warming shallow water, often with well-developed macrophytes, weak water exchange with open areas of the lake and significant influence of terrigenous runoff. These prerequisites predetermine the formation of plankton communities with individual characteristics developed in the process of natural limnogenesis. This area of the lake is differ by an increased level of trophic state (Tekanova et al., 2023) which is showed in the imbalance of production and destruction processes and is accompanied by enrichment of the ecosystem with organic matter. Therefore structural and quantitative reorganizations of all biota links occur in this unique area of Lake Onego (Vislyanskaya et al., 1999). One of the important components of biomonitoring of aquatic ecosystems is the ecological and sanitary water quality assessment, where bacteria play an important role. Quantitative indicators of bacterioplankton and its size-morphological structure depend both on natu-

*Corresponding author.

E-mail address: emm777@bk.ru (E.M. Makarova)

Received: July 31, 2024; **Accepted:** January 15, 2025;

Available online: February 26, 2025



Fig.1. Ensemble of the Kizhi Pogost.

ral water properties of waterbodies and on introduced pollution from the adjacent territory. Microorganisms take part in self-purification of waterbodies and serve as indicators of organic matter (OM) pollution. Bacteria react faster than other ecosystem components to minor changes in environmental conditions because of high metabolic rate.

The aim of the work is to assess the water quality of the Kizhi skerries of Lake Onego by bacterioplankton indicators.

2. Materials and methods of research

2.1. Object of the study

The chemical composition of the water of the Kizhi Skerries is similar to the central deep-water part of the Lake Onego in most chemical indicators, and is characterized by a low content of nutrients (Galakhina et al., 2022) (Table 1). Despite the fact that in recent decades there have been decreases in total phosphorus, nitrates and easily mineralized OM, determined by the BOD_5 value, there is a tendency towards an increase in water color and Fe_{tot} as a result of the increasing influence of the catchment area (Galakhina et al., 2022). Every year, water is polluted with oil products, the content of which can exceed the MAC for fishery waters by 3–12 once (Protasov, 1999; Sabylina, 1999; Sabylina et al., 2012).

The impact of cesspools, toilets and baths located along the shores of the islands within a radius of 10 km from Kizhi Island on the territory of the protected area of the Kizhi Museum-Reserve is noted (Protasov, 1999).

2.2. Sampling

Water samples were taken in July 2023 at 5 stations near Kizhi Island (Fig. 2). A total of 12 water samples were collected. The stations differed on depth and degree of anthropogenic load. Depth of stations: st. Z1 – 5.8 m, st. Z2 – 5.7 m, st. Z3 – 10 m, st. Z4 – 7.4 m, st. Z5 – 8.5 m. The greatest anthropogenic load is characteristic of stations Z1, Z2 and Z4, with stagnant conditions: low water exchange, shallow depths,

active navigation, more intense heating of water, and the presence of bed macrophyte. Water samples were taken from surface and bottom horizons. At deep stations (stations Z3, Z5) additional samples were taken at the depth of transparency (3.5 m). Water temperature during the sampling period at the stations varied from 12° to 18°C (Fig. 3).

2.3. Methods for microbiological analysis

Linear cell size, average cell volumes and bacterial biomass were determined only in samples from surface layers. Total bacterial abundance (TBA), abundance of ecological-trophic groups of bacterioplankton: heterotrophic (HB) and saprophytic bacteria (SB), phenol-oxidizing (POB) and hydrocarbon-oxidizing (HOB) bacteria was determined in all samples. Presence of opportunistic microorganisms were observed by total coliform bacteria (TCB) and total microbial count (TMC).

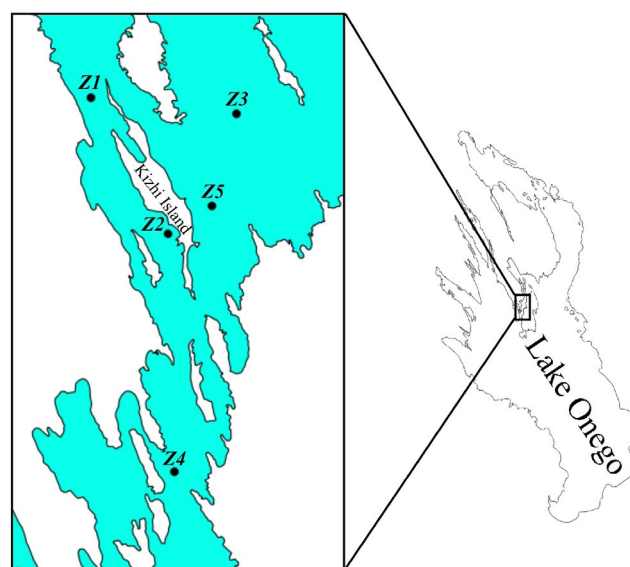


Fig.2. Bacterioplankton sampling scheme in summer 2023.

Table 1. Water chemical characteristics of the Kizhi skerries of Lake Onego area

Characteristics	Values of indicators	Reference
Color, mg Pt-Co/L	34	Zobkov et al., 2022
pH	7.3	Galakhina et al., 2022
COD _{Mn} , mg O/L	6.3	Zobkov et al., 2022
COD _{Cr} , mg O/L	17.6	
BOD ₅ , mg O ₂ /L	0.7	Galakhina et al., 2022
TN, mg/L	0.25	
NO ₂ -N, mg/L	< 0.001	Zobkov et al., 2022
NO ₃ -N, mg/L	0.05	
NH ₄ -N, mg/L	0.014	Galakhina et al., 2022
TP, µg P/L	9	Zobkov et al., 2022
IP, µg P/L	< 2	
Fe _{tot} , mg/L	0.09	
Oil products, mg/L	0.5	Sabylina et al., 2012

Note. COD_{Mn} – chemical oxygen demand with permanganate as the oxidant; COD_{Cr} – chemical oxygen demand with dichromate as the oxidant; BOD₅ – biological oxygen demand in 5 days; TN – total nitrogen; TP – total phosphorus; IP – inorganic phosphorus.

Total bacterial abundance was determined by direct counting on black polycarbonate track membranes ($D_{\text{pore}} = 0.2 \mu\text{m}$) by Whatman on a fluorescent microscope MIKMED-2 (magnification $\times 1600$) with preliminary staining of cells with acridine orange (Handbook..., 1993). Cell sizes were measured using the computer program MultiMedia Catalog (MMC), which has the ability to calibrate the scale. The average cell volume (V_{av}) was calculated as the volume of stereometric figures matching their shape (Krambeck et al., 1981; Kuznetsov and Dubinina, 1989). Bacterial biomass (BB) was calculated as the product of the mean bacterial cell volume and total bacterial abundance (Kuznetsov and Dubinina, 1989).

Saprophytic bacteria (SB) were grown on concentrated production fish-peptone agar (FPA) at 22°C during 10 days. Heterotrophic bacteria (HB) were sown on FPA:10 (FPA diluted 10 times) and cultured for 10 days at 22°C (Kuznetsov and Dubinina, 1989). The number of phenol-oxidizing bacteria (POB) was determined on mineralized medium with phenol addition (Kuznetsov and Dubinina, 1989). Hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB) were grown on specialized Voroshilova-Dianova medium with addition of purified Difco agar. Before sowing, TVIN-80 and fuel oil were added to the sterile molten medium as an emulsifier of solar oil (Kuznetsov and Dubinina, 1989). The total microbial count (TMC) or the number of bacteria capable of multiplying in warm-blooded animals and humans was incubated on FPA medium for 24 h at 37°C (Methodological guidelines 4.2.1884-04). Platings was carried out by the depth method.

Water samples were filtered through membrane filters ($D_{\text{pore}} = 0.45 \mu\text{m}$) for the determination of total coliform bacteria (TCB). Colonies were grown on filters placed on agarized Endo medium at 37°C for 24 hr. After incubation, the cytochrome oxidase test was performed, TCB was counted based on a negative oxidase test (Methodological guidelines 4.2.1884-04).

2.4. Assessment of water quality by microbiological indicators

For the saprobiological assessment of the water of the Kizhi skerries, the V.I. Romanenko scale was used (the ratio of SB/ TBA, %) (Romanenko, 1985; Dzyuban, 2000): < 0.003 – especially clean; 0.003–0.03 – clean; 0.03–0.1 – slightly polluted; 0.1–0.3 – polluted; 0.3–3.0 – dirty; > 3.0 – especially dirty. The water quality class was assessed according to the complex ecological classification of terrestrial surface water quality according to the indicators of TBA, SB and TCB (Table 2) (Oksiyuk et al., 1993).

For correct assessment of water quality by indicators of total bacterioplankton abundance according to the scale of V.I. Romanenko (1985) and the classification proposed by O.P. Oksiyuk et al. (1993) (light microscopy with cell staining with erythrosine), a coefficient of 2.06 was used to convert to a new method (epifluorescence microscopy with cell staining with acridine orange) (Makarova et al., 2022).

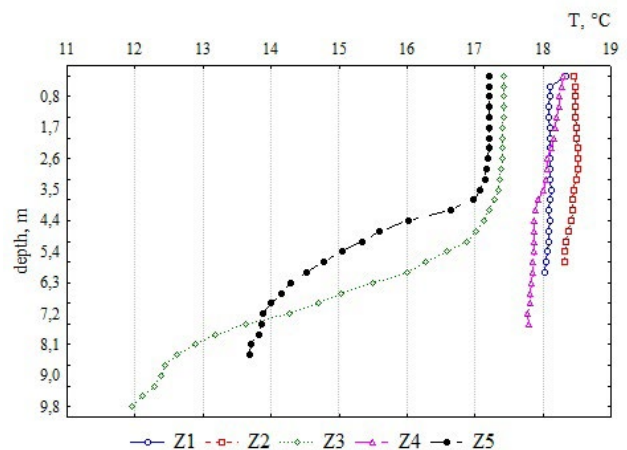


Fig.3. Water temperature at the stations during the sampling period.

Table 2. Assessment of the ecological state of water based on microbiological indicators (Oksiyuk et al., 1993)

Indicators	Water quality classes				
	1	2	3	4	5
	extremely clean	clean	satisfactory cleanliness	polluted	dirty
TBA, $\cdot 10^6$ cells/ml	< 0.3	0.3–1,5	1.6–5.0	5.1–10.0	> 10.1
SB, $\cdot 10^3$ CFU/ml	< 0.1	0.1–1.0	1.1–5.0	5.1–10.0	> 10.1
TCB, $\cdot 10^3$ CFU/L	< 0.003	0.003–2.0	2.1–10.0	11.0–100.0	> 101.0

The intensity of self-purification processes was estimated by the ratio of saprophytic bacteria and total microbial count (SB/TMC) – self-purification coefficient (C_{sp}) (Methodological guidelines 4.2.1884-04). C_{sp} below the critical level of 4 indicates the presence of opportunistic microorganisms, as well as low rates of self-purification in various parts of the waterbody (Methodological guidelines 4.2.1884-04). The degree of pollution of lake water by oil compounds was assessed by the number of HOB, which, when exceeding 5% of the SB, indicates water pollution by oil products (Razumov and Korsh, 1960). The degree of lake water pollution by phenolic compounds was assessed according to the classification of fresh water quality by phenol-oxidizing bacteria (POB) development (Vinogradov et al., 2001).

Weighted averages of total bacteria abundance and abundance of ecological-trophic groups of bacterioplankton in the water column were used to correctly compare stations with different depths.

2.5. Statistical analysis

Samples were compared using the nonparametric Mann-Whitney U test. When comparing the obtained data with the data of previous studies, the confidence range (tm) and the range of variation (min–max) were determined. Statistical data processing was performed in the licensed package Statistica Advanced 10 for WindowsRu.

3. Results and discussion

The morphological structure of bacterioplankton is often used in assessing the quality of waterbodies. It is known that bacterial bacilliforms are an active component of the bacterial community (Rumyantseva and Kosolapov, 2015; Kuznetsova, 2017; Kuznetsova et al., 2020).

The morphological composition of bacterioplankton of the Kizhi skerries was characterized by the prevalence of bacilliform forms, which indicates the presence of organic matters (OM) of different nature and their destruction, indicating the intensive of self-purification processes at the studied stations (Razumov, 1962; Shornikova, 2008; Khmelevskaya, 2013; Tokinova et al., 2014; Bogdanova, 2015).

The size structure of the bacterial community allows us to assess its functional state. Small cocci (0.2–0.35 μm) and large bacilli (> 2 μm) with intensive metabolism (Kuznetsova, 2017; Kuznetsova et al.,

2020) had a larger share in the bacteriocoenosis at stations Z2 and Z3 (total 10% and 15%, respectively) (Fig. 4), which indicates a more active consumption of organic matter from the surrounding aquatic environment by bacterioplankton and self-purification processes. Medium-sized cocci (0.35–0.45 μm), having slower metabolic rates compared to small cocci (Kuznetsova et al., 2020), had the highest proportion on st. Z4. The least active components of the bacterial community, large cocci (0.45–0.8 μm) and small bacilli (< 2 μm) (Kuznetsova, 2017), were characteristic of st. Z1 and st. Z5 (total 83% and 81, respectively) (Fig. 4).

In general, the size-morphological structure of bacterioplankton indicates a faster self-purification process at st. Z2 and st. Z3 compared to other stations of the Kizhi skerries.

The average cell volume was comparable at all studied areas of the Kizhi skerries (Table 3). The TBA in the water surface varied insignificantly (the difference between the minimum and maximum values was less than 1.5 times). The distribution of bacterial biomass (BB) on the water surface mainly depends on the distribution of TBA, however, at stations Z1 and Z3 – on the changes in V_{av} .

The mean values of total bacterial abundance (TBA) in the water column near Kizhi Island varied within narrow ranges with maximum values at st. Z2. (Table 4). High numbers of heterotrophic bacteria (HB), which are the dominant group in micrococenoses due to their ability to grow at high rates at low concentrations of organic matter, were observed at all studied stations. The greatest HB development is characteristic of the western coast of Kizhi Island – st. Z1 and st. Z2 (Table 4).

Average numbers of saprophytes bacteria (SB) in the water column witness about increased concentrations of OM at st. Z1. SB have maximum values about

Table 3. Spatial distribution in the water surface layer of total bacterial abundance (TBA), bacterial biomass (BB) and average cell volume (V_{av}) in water of Kizhi skerries of Lake Onego.

Stations	TBA, mln cells/ml	V_{av} , μm^3	BB, mg/L
Z1	2.75	0.092	0.332
Z2	3.49	0.068	0.292
Z3	2.62	0.093	0.330
Z4	3.74	0.091	0.474
Z5	3.33	0.083	0.364

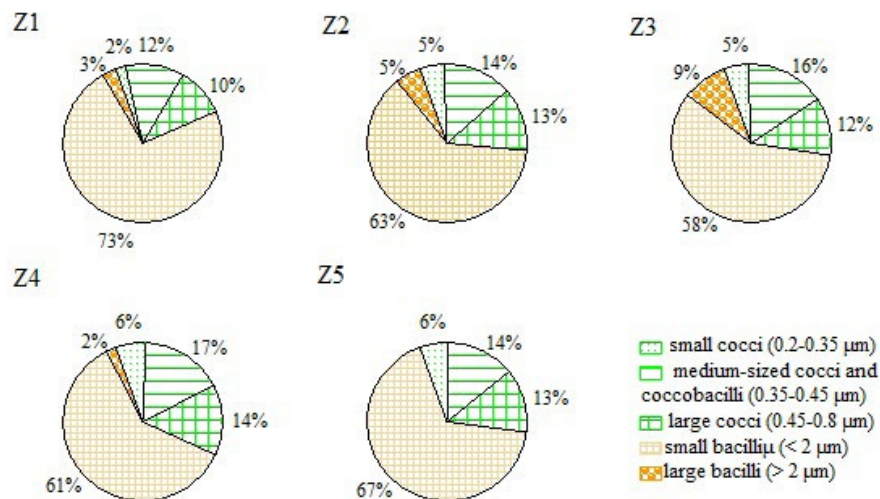


Fig.4. Share of different size-morphological groups in bacterioplankton of Kizhi skerries of Lake Onego.

here. Self-purification coefficient (C_{sp}) – SB/TMC ratio, below the limit value of 4, indicates the incompleteness of self-purification processes on the southwestern coast of Kizhi Island (st. Z2) and the possible presence of opportunistic microorganisms in this area (Table 4).

An important part of the research was the study of opportunistic microorganisms by the total coliform bacteria (TCB). The number of TCB this is evidenced about fecal contamination of water and its safety for recreational use. According to SanPiN 1.2.3685-21 the number of TCB in recreational areas should not exceed 500 CFU/100 cm³. The number of TCB exceeded the critical value at the stations with lentic water and active navigation: st. Z1, st. Z2, st. Z4 (Table 4).

According to the water quality scale of V.I. Romanenko (1985), the water at st. Z3 was “clean” and at the rest of the Kizhi Island water area – “slightly polluted”. In accordance with the complex ecological classification of surface water quality (Oksiyuk et al., 1993), on indicators of TBA, SB and TCB, water at st. Z3 corresponded to quality class 2 – “clean waters”, water at other stations of the Kizhi skerries corresponded to quality class 3 – waters of “satisfactory cleanliness”.

Indicators of water pollution by phenolic compounds are phenol-oxidizing bacteria (POB), whose abundance characterized all studied areas of the Kizhi

skerries as “satisfactorily cleanliness” (3-rd quality class) according to the freshwater quality classification (Vinogradov et al., 2001).

The presence of petroleum hydrocarbons is characteristic for the entire Kizhi skerries area due to active shipping, which causes the development of hydrocarbon-oxidizing bacteria. It is considered that the abundance of HOB exceeding 5% of the SB is indicative of water pollution by oil products (Razumov and Korsh, 1960). Thus, on average proportion of HOB from the abundance of SB was the lowest on stations Z4 and Z5 (6% and 8%, respectively), while on st. Z1 their proportion was 31%, on st. Z2 – 12%, on st. Z3 – 46%, indicating the pollution of the western and eastern coasts of Kizhi Island by oil hydrocarbons. It is interesting that st. Z3 was characterized as a clean site on indicators of TBA, SB, TCB and TMC indicators. However, numbers of HOB characterized water quality as opposite. Perhaps raising the HOB at st. Z3 is important due to the intensive movement of small vessels operating on tourist routes around Kizhi Island.

In general, the development of ecological-trophic groups of the bacterioplankton community near Kizhi Island was uneven. The greatest development of bacterioplankton was typical of stations with low water exchange (stations Z1, Z2 and Z4).

Table 4. Microbiological characterization of waters of the Kizhi skerries (weighted average values in the water column), and water quality according to various indicators

Stations	TBA	HB	SB	POB	HOB	TMC	TCB	C_{sp}	SB/TBA, %	Quality class (Oksiyuk et al., 1993)
	mln cells/ml	CFU/ml					CFU/100 cm ³			
Z1	2.30	3639	1187	559	326	119	860	5	0.11	3
Z2	3.14	2746	699	325	99	208	2580	1	0.05	3
Z3	2.13	1063	333	286	126	16	290	126	0.03	2
Z4	2.62	1411	912	127	50	116	804	4	0.07	3
Z5	2.79	1319	828	371	44	99	301	52	0.06	3

Note: TBA – total bacterial abundance; HB – heterotrophic bacteria; SB – saprophytic bacteria; POB – phenol-oxidizing bacteria; HOB – hydrocarbon-oxidizing bacteria; TMC – total microbial count; TCB – total coliform bacteria; C_{sp} – self-purification coefficient; The values of the TCB that exceed the standards of SanPiN 2.1.3685-21 are highlighted in bold.

Nonparametric analysis of the Mann-Whitney U-test revealed statistically significant differences in the abundance of TCB between the skerry areas (st. Z1, st. Z2, st. Z4) and open areas (st. Z3, st. Z5) of the Kizhi Island. No statistically significant differences were found in the abundance of other ecological-trophic groups of bacterioplankton (Table 5).

The obtained 2023 data on TBA and abundance of SB, HB, HOB and POB were compared with data from the summer period (June–August) of previous studies – 1994–2009 from stations Z1–Z4 from different horizons (Syarki et al., 2015) (Table 6). Data analysis showed that at St. Z2 and St. Z4, TBA for 2023 is outside the confidence range of previous studies, but this increase in TBA is small. Changes in the abundance of ecological-trophic groups of bacterioplankton were noted to a greater extent. Thus, at st. Z1, the indicators obtained in 2023 are out of the confidence range of the values obtained for the period 1994–2009 (Table 6). There is a slight increase in HB and HOB, and an order of magnitude excess of SB and POB on st. Z1. Numbers of SB and HB at st. Z2 and HB and HOB at st. Z3 are slightly outside the confidence range of data from previous studies (Table 6). Also at st. Z3, an increase POB on 2-4 times was observed compared to previous studies, and at st. Z4 there is an order of magnitude increase in SB abundance.

The increase in the number of ecological-trophic groups of bacterioplankton proves that over the last 15 years, the anthropogenic load near Kizhi Island has increased due to the increase in tourism associated with increased transport load.

4. Conclusions

In summer 2023 the studied skerry area of Lake Onego was characterized by the presence of pollutions

Table 5. Significance levels of the Mann–Whitney U-test between sampling stations in the skerry area (st. Z1, st. Z2, st. Z4) and stations in the open part (st. Z3, st. Z5) of Kizhi skerries of Lake Onego.

Indicators	p-levels
TBA	0.337
SB	0.109
HB	0.109
TMC	0.055
HOB	0.631
POB	0.749
TCB	0.011

Note: * Shown in bold type are the loads of features with a significant contribution ($p < 0.05$); TBA – total bacterial abundance; SB – saprophytic bacteria; HB – heterotrophic bacteria; HOB – hydrocarbon-oxidizing bacteria; POB – phenol-oxidizing bacteria; TCB – total coliform bacteria.

with easily mineralizable OM, phenolic compounds and petroleum products, as evidenced by high indices of the number of ecological-trophic groups of bacterioplankton. The size and morphological structure of bacteria also confirms the presence of OM contamination by water near Kizhi Island and its consumption by bacteria. Sanitary and bacteriological condition of water by microbiological specify indicate the presence of opportunistic microorganisms determined by the number of TCB which almost universally were exceeded the norms for waterbodies of recreational use.

The most polluted are the stations on the western shore of Kizhi Island (stations Z1 and Z2), where slower water exchange and better water heating are noted. The cleanest part of water masses of Kizhi Island is st. Z3 – open stretch with more intensive water exchange with the central part of the lake.

Table 6. Bacterioplankton of the Kizhi skerries of Lake Onego in different periods of research

Indicators	Research period	St. Z1	St. Z2	St. Z3	St. Z4
TBA, mln cells/ml	1994–2009 rr.	<u>0.85–4.89 (4)*</u> 0–5.52	<u>0.75–3.39 (9)</u> 1.17–2.88	<u>0.72–4.78 (11)</u> 1.35–3.09	<u>0.78–2.88 (4)</u> 0–2.98
	2023 r.	2.62–3.30 (2)	3.42–3.74 (2)	2.37–2.75 (3)	3.14–3.33 (2)
SB, CFU/ml	1994–2009 rr.	<u>98–644 (2)</u> 0–845	<u>114–2316 (8)</u> 0–1186	<u>8–1576 (11)</u> 53–638	<u>190–401 (4)</u> 145–470
	2023 r.	1240–1820 (2)	154–1440 (2)	361–426 (3)	710–1540 (2)
HB, CFU/ml	1994–2009 rr.	<u>338–775 (2)</u> 0–3334	<u>277–3352 (4)</u> 0–3689	<u>44–2520 (7)</u> 11–1594	<u>215–1510 (3)</u> 0–2432
	2023 r.	3770–5610 (2)	980–5280 (2)	960–1640 (3)	1500–1980 (2)
HOB, CFU/ml	1994–2009 rr.	<u>86–133 (2)</u> 0–408	<u>0–786 (5)</u> 0–786	<u>18–284 (7)</u> 18–284	<u>11–216 (4)</u> 0–228
	2023 r.	221–620 (2)	14–211 (2)	69–371 (3)	52–72 (2)
POB, CFU/ml	1994–2009 rr.	<u>8–12 (2)</u> 0–35	<u>70–1140 (4)</u> 0–1232	<u>8–132 (6)</u> 8–132	<u>77–1264 (3)</u> 0–2158
	2023 r.	640–800 (2)	81–660 (2)	300–500 (3)	147–166 (2)

Note: * $\frac{Min - Max(n)}{tm}$; Bold – indicates values of indicators beyond of significant contribution (tm); TBA – total bacterial abundance; SB – saprophytic bacteria; HB – heterotrophic bacteria; HOB – hydrocarbon-oxidizing bacteria; POB – phenol-oxidizing bacteria.

Compared to the previous study period, the summer 2023 was characterized by higher bacterioplankton abundance due to the increment of tourist load connected in increased shipping traffic.

Acknowledgements

The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 23-17-20018, <https://rscf.ru/project/23-17-20018/>, conducted jointly with the authorities of the Republic of Karelia with funding from the Venture Capital Fund of the Republic of Karelia (VCF RK)

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Bogdanova O.Yu. 2015. Taxonomic composition of the microbial population of the littoral of the Kola Bay. *Evrasijskij Soyuz Uchenyh* [Eurasian Union of Scientists] 4 (13): 8–11. (in Russian)
- Dzyuban A.N. 2000. Bacterioplankton and microbiological oxidation of methane in the water of a polluted small river. *Biologiya vnutrennih vod* [Biology of inland waters] 2: 65–72. (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)
- Handbook of methods in aquatic microbial ecology. 1993. In: Kemp P.F., Sherr B.F., Sherr E.B. et al. (Eds.). Washington: Levis Publishers, CRC Press LLC.
- Khmelevskaya I.A. 2013. Microbiological indication of aquatic environment pollution. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Pskov State University. Series: Natural and physical-mathematical sciences] 3: 37–46. (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)
- Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. 1989. Methods for studying aquatic microorganisms. Moscow: Nauka. (In Russian)
- Kuznetsova E.V. 2017. Microbial community of coastal shallow waters of the Rybinsk Reservoir under the influence of colonial birds. PhD dissertation, I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters, Borok, Russia.
- Kuznetsova E.V., Kosolapov D.B., Kosolapova N.G. 2020. Taxonomic and size-morphological groups of bacterioplankton in two Mongolian reservoirs. *Biology Bulletin* 47(1): 27–34. DOI: [10.1134/S1062359019060104](https://doi.org/10.1134/S1062359019060104)
- Lake Onego. Atlas. 2010. In: Filatov N.N. (Ed.). Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Makarova E.M., Tekanova E.V., Kalinkina N.M. 2022. Bacterioplankton Status in the Lososinka River (Tributary of Lake Onego) and the Water Quality by Microbiological Indicators. *Biology Bulletin* 49(10): 1996–2003. DOI: [10.1134/S1062359022100363](https://doi.org/10.1134/S1062359022100363)
- Methodological guidelines 4.2.1884-04. 2004. “Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water from surface waterbodies”. (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)
- Protasov Yu.G. 1999. Some topical issues of anthropogenic impact on the territory of the protected zone of the Kizhi Museum-Reserve. *Trudy KarNC RAN. Seriya B. «Biogeografiya Karelii»* [Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Series B. “Biogeography of Karelia”] 1: 126–130. (In Russian)
- Razumov A.S. 1962. Microbial plankton of water. In: Zenkevich L.A. (Ed.), *Transactions of the All-Union Hydrobiological Society: collection of articles*. 12. Moscow, pp. 60–190. (In Russian)
- Razumov A.S., Korsh L.E. 1960. Methods of sanitary and microbiological research. Techniques for sanitary study of reservoirs. Moscow: Medgiz. pp. 241–312. (In Russian)
- Report on the activities of the State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve “Kizhi”, 2022. 2023. In: Bazegskoy E.B. (ed.), Ministry of Culture of the Russian Federation, FGBUK “State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve “Kizhi””. - Petrozavodsk: Publishing Center of the Kizhi Museum-Reserve. (In Russian).
- Romanenko V.I. 1985. Microbiological processes of production and destruction of organic matter in inland waters. Leningrad: Science. (In Russian)
- Rumyantseva E.V., Kosolapov D.B. 2015. Size-morphological structure and activity of bacterioplankton in the littoral zone of a large lowland reservoir. *Tezisy dokladov i stendovyh soobshchenij* [Abstracts of reports and poster presentations] 23: 302. (In Russian)
- Sabylina A.V. 1999. Modern hydrochemical regime of the lake. In: Filatov N.N. (ed.), *Lake Onego. Environmental problems*. Petrozavodsk, pp. 58–108. (In Russian)
- Sabylina A.V., Efremova T.A., Ryzhakov A.V. et al. 2012. Biogenic elements and organic matter in Lake Onego and its bays. In: Lozovik P.A. (ed.), *Organic matter and biogenic elements in inland waters and sea waters. Proceedings of the V All-Russian Symposium with International Participation*, pp. 75–78. (In Russian)
- SanPiN 1.2.3685-21. 2021. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing. (In Russian)
- Shornikova E.A. 2008. Microbiological indication of the state of watercourse ecosystems in oil fields of the Middle Ob region. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal* [Siberian Ecological Journal] 15 (3): 417–425. (In Russian)
- State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2022: information electronic publication. 2023. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Karelia. In: Gromtsev A.N., Karginova-Gubinova V.V., Kuznetsov O.L. et al. (eds.). Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (In Russian)
- Syarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A. 2015. Plankton of the pelagic zone of Lake Onego. Certificate of state registration of the database No. 2015620274. Copyright holder: Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Northern Water Problems, Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (IVPS KarRC RAS) (RU) Date of registration in the database registry: February 13, 2015. (In Russian)
- Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Makarova E.M. et al. 2023. The current trophic state and water quality of Lake Onego. *Inland Water Biology* 16(6): 967–973.

Tokinova R.P., Abramova K.I., Morozova O.V. et al. 2014. Comparative assessment of water quality in a multi-purpose reservoir by bacterioplankton, phytoplankton and zoobenthos. *Voda: himiya i ekologiya* [Water: chemistry and ecology] 9: 54–58. (In Russian)

Vinogradov G.A., Zharikov G.P., Berezina N.A. et al. 2001. Development of a regional classification of water quality based on monitoring of the Kotorosl River and its tributaries. *Environmental problems of the Upper Volga: Collective monograph*. Yaroslavl, pp. 210–221. (In Russian)

Vislyanskaya I.G., Kulikova T.P., Polyakova T.N. et al. 1999. Current state of hydrobiocenoses in the Kizhi skerries area of Lake Onego. *Trudy KarNC RAN. Seriya B. «Biogeografiya Karelii»* [Proceedings of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Series B. “Biogeography of Karelia”] 1: 113–120. (In Russian)

Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. et al. 2022. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019-2021. *Data in Brief* 42: 108079. DOI: [10.1016/j.dib.2022.108079](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079)

Оценка качества воды в районе музея-заповедника «Кижы» (Онежское озеро) по показателям бактериопланктона за летний период 2023 года

Макарова Е.М.*

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

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты микробиологических исследований акватории Онежского озера в районе о. Кижы за летний период 2023 г. Определены размерно-морфологическая структура бактериопланктона, количественные показатели эколого-трофических групп бактерий и обобщенных колиформных бактерий. В морфологической структуре клеток доминировали палочковидные формы, свидетельствующие о присутствии легкоминерализуемого органического вещества (ОВ). Общая численность бактерий, численность гетеротрофных и сапрофитных групп бактериопланктона подтверждали повышенное содержание легкоминерализуемого ОВ в районе Кижских шхер. По развитию фенолоксиляющих и углеводородоксиляющих бактерий выявлено загрязнение воды фенольными соединениями и нефтепродуктами. Высокие показатели обобщенных колиформных бактерий, численность которых почти повсеместно превышала нормативы для водоемов рекреационного использования, свидетельствовали о присутствии условно-патогенных микроорганизмов. Наиболее загрязненным участком Кижских шхер является их западная часть, характеризующаяся активным судоходством и замедленным водообменом.

Ключевые слова: о. Кижы, бактериопланктон, размерно-морфологическая структура, численность эколого-трофических групп, обобщенные колиформные бактерии, оценка качества воды

Для цитирования: Макарова Е.М. Оценка качества воды в районе музея-заповедника «Кижы» (Онежское озеро) по показателям бактериопланктона за летний период 2023 года // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - С. 52-67. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-52

1. Введение

Государственный природный заказник «Кижский» – это особо охраняемая природная территория федерального значения, площадь которой 50 000 га (Государственный доклад..., 2023). Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижы» объединил на о. Кижы 68 памятников архитектуры. Жемчужиной острова является архитектурный ансамбль Кижского погоста (Онежское озеро..., 2010) (Рис. 1), который стал одним из трех первых российских объектов в Списке всемирного культурного наследия ЮНЕСКО в 1990 г.

В 2022 г. музей-заповедник «Кижы» посетило более 360 тыс. туристов из России и зарубежья. Акватория озера в районе Кижских шхер испытывает большую антропогенную нагрузку за счет водного транспорта, а также служит приемником хозяйственно-бытовых сточных вод с территории

музея-заповедника и стоков с сельскохозяйственных угодий (Протасов, 1999; Отчет..., 2023).

Водные сообщества Кижских шхер формируются под влиянием экологических условий, определяющихся ландшафтными особенностями района, резко отличающимися его от других участков Онежского озера. Развитие биоты происходит здесь в условиях быстро прогреваемого мелководья, часто с хорошо развитой высшей водной растительностью, замедленного водообмена с открытыми участками озера и значительного влияния терригенного стока. Указанные предпосылки определяют формирование планктонных сообществ с индивидуальными характеристиками, сложившимися в процессе естественного лимногенеза. Данный район озера выделяется повышенным уровнем трофии (Tekanova et al., 2023), что проявляется, прежде всего, в дисбалансе продукционно-деструкционных процессов и сопровождается обогащением

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: emm777@bk.ru (Е.М. Макарова)

Поступила: 31 июля 2024; Принята: 15 января 2025;
Опубликована online: 26 февраля 2025

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





Рис.1. Архитектурный ансамбль Кижского погоста.

экосистемы органическим веществом, вследствие чего происходят структурные и количественные перестройки всех звеньев биоты в этом уникальном районе Онежского озера (Вислянская и др., 1999). Одной из важных составляющих биомониторинга водных экосистем является оценка экологического и санитарного качества воды, где немаловажную роль играют бактерии. Количественные показатели бактериопланктона и его размерно-морфологическая структура зависят как от природных свойств воды водоемов, так и от привносимых загрязнений с прилегающей территории. Микроорганизмы принимают участие в самоочищении водоемов и служат индикаторами загрязнения органическим веществом (ОВ). Высокая скорость метаболизма бактерий позволяет им быстрее, чем другим компонентам экосистемы, реагировать на незначительные изменения условий среды.

Цель работы – оценить качество воды Кижских шхер Онежского озера по показателям бактериопланктона.

2. Материалы и методы исследования

2.1. Объект исследования

Химический состав воды Кижских шхер по большинству химических показателей схож с центральной глубоководной частью озера, и характеризуется низким содержанием биогенных веществ (Galakhina et al., 2022) (Таблица 1). Несмотря на то, что за последние десятилетия отмечаются снижения общего фосфора, нитратов и легкоминерализуемого ОВ, определяемого по величине БПК₅, отмечается тенденция к увеличению цветности воды и Fe_{общ} в результате увеличения влияния водосборной территории (Galakhina et al., 2022). Ежегодно происходит загрязнение воды нефтепродуктами, содержание которых может превышать ПДК для рыбохозяйственных водоемов в 3–12 раз (Протасов, 1999; Сабылина, 1999; Сабылина и др., 2012).

Отмечается влияние на территории охранной зоны музея-заповедника «Кизи» выгребных ям, туалетов и бань, находящихся по берегам островов в радиусе 10 км от о. Кизи (Протасов, 1999).

2.2. Отбор проб

Пробы воды были отобраны в июле 2023 г. на 5 станциях возле о. Кизи (Рис. 2). Станции отличались по глубине и степени антропогенной нагрузки. Глубина станций: ст. Z1 – 5.8 м, ст. Z2 – 5.7 м, ст. Z3 – 10 м, ст. Z4 – 7.4 м, ст. Z5 – 8.5 м. Наибольшая антропогенная нагрузка характерна для станций Z1, Z2 и Z4, отличающихся застойными условиями: замедленным водообменом, небольшими глубинами, активным судоходством, хорошим прогревом воды, а также присутствием зарослевой растительности. Пробы воды отбирали с поверхностного и придонного горизонтов. На более глубоких станциях (ст. Z3 и Z5) дополнительно были отобраны пробы на глубине прозрачности (3.5 м). Всего было отобрано 12 проб воды. Температура воды в период отбора проб на станциях изменялась от 12° до 18°C (Рис. 3).

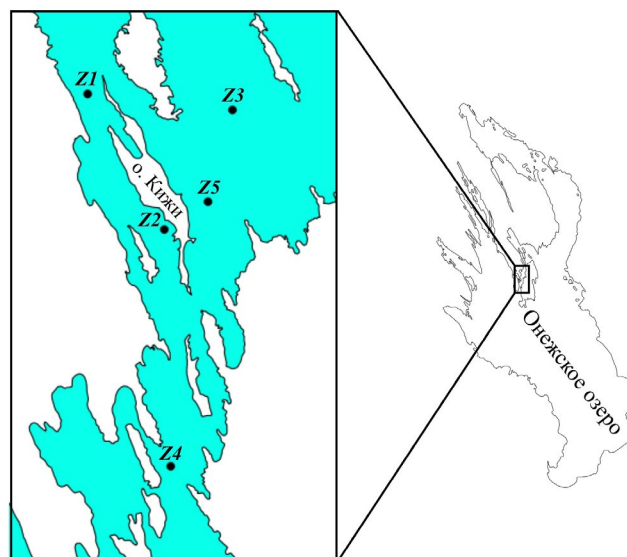


Рис.2. Карта-схема станций отбора проб бактериопланктона в летний период 2023 года.

Таблица 1. Химическая характеристика воды района Кижских шхер Онежского озера

Показатели	Значения показателей	Ссылка
Цветность, мг Pt-Co/л	34	Zobkov et al., 2022
pH	7.3	Galakhina et al., 2022
ПО, мг O/л	6.3	Zobkov et al., 2022
ХПК, мг O/л	17.6	
БПК ₅ , мг O ₂ /л	0.7	Galakhina et al., 2022
N _{общ} , мг N/л	0.25	
NO ₂ -N мгN/л	<0.001	Zobkov et al., 2022
NO ₃ -N мг N/л	0.05	
NH ₄ -N, мгN/л	0.014	Galakhina et al., 2022
P _{общ} , мкг P/л	9	Zobkov et al., 2022
P _{мин} , мкг P/л	<2	
Fe, мг/л	0.09	
Нефтепродукты, мг/л	0.5	Сабылина и др., 2012

2.3. Методы микробиологического анализа

Линейный размер клеток, их средние объемы и биомасса бактерий были определены только в 5 пробах поверхностного горизонта. Во всех пробах определяли общую численность бактерий (ОЧБ), а также численность эколого-трофических групп бактериопланктона: гетеротрофных (ГБ) и сапрофитных бактерий (СБ), фенолоксиляющих (ФОБ) и углеводородоксиляющих (УОБ) бактерий. Присутствие условно-патогенных микроорганизмов оценивали по численности обобщенных колиформных бактерий (ОКБ) и общему микробному числу (ОМЧ).

Общую численность бактерий определяли методом прямого счета на черных поликарбонатных трековых мембранах ($D_{пор} = 0.2$ мкм) производства Whatman 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 (ММС), обладающей возможностью калибровки шкалы. Средний объем клеток ($V_{ср}$) вычисляли как объем подходящих им по форме стереометрических фигур (Krambeck et al., 1981; Кузнецов и Дубинина, 1989). Биомассу бактерий (ББ) рассчитывали как произведение среднего объема бактериальных клеток и общей численности бактерий (Кузнецов и Дубинина, 1989).

Сапрофитные бактерии (СБ) выращивали на концентрированном производственном рыбо-пептонном агаре (РПА) при 22°C в течение 10 дней. Гетеротрофные бактерии (ГБ) высевали на РПА:10 (РПА, разведенный в 10 раз) и культивировали в течение 10 дней при 22°C (Кузнецов и Дубинина, 1989). Численность фенолоксиляющих бактерий (ФОБ) определяли на минерализованной среде с добавлением фенола (Кузнецов и Дубинина, 1989). Углеводородоксиляющие бактерии (УОБ) выращи-

вали на специализированной среде Ворошиловой-Диановой с добавлением очищенного агара Дифко. Перед посевом в стерильную расплавленную среду в качестве эмульгатора солянки добавляли ТВИН-80 и мазут (Кузнецов и Дубинина, 1989). Общее микробное число (ОМЧ) или численность бактерий, способных размножиться в организме теплокровных животных и человека, инкубировали на среде РПА в течение 24 ч при температуре 37°C (МУК 4.2.1884-04). Посевы проводили глубинным методом.

Для определения обобщенных колиформных бактерий (ОКБ) пробы воды фильтровали через мембранные фильтры ($D_{пор} = 0.45$ мкм). Колонии росли на фильтрах, помещенных на агаризованную среду Эндо, при 37°C в течение 24 ч. После инкубации выполнялся цитохромоксидазный тест, учет ОКБ осуществляли по отрицательному оксидазному тесту (МУК 4.2.1884-04).

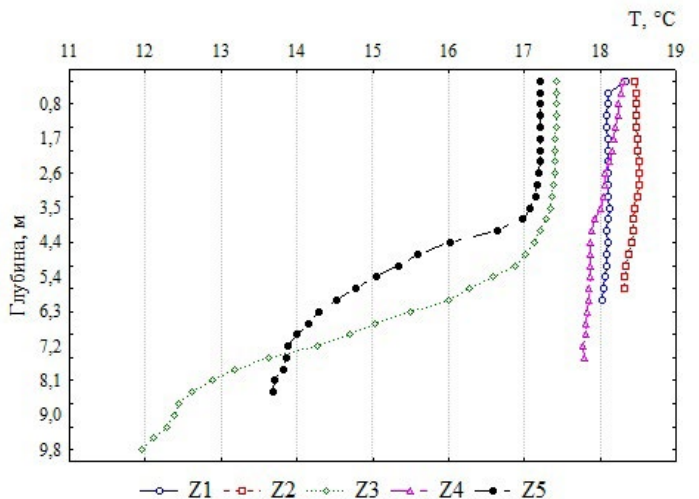


Рис. 3. Температура воды на станциях в период отбора проб.

Таблица 2. Оценка экологического состояния воды по микробиологическим показателям (Оксиюк и др., 1993)

Показатели	Классы качества воды				
	1	2	3	4	5
	предельно чистая	чистая	удовлетворительной чистоты	загрязненная	грязная
ОЧБ, млн кл./мл	< 0.3	0.3–1.5	1.6–5.0	5.1–10.0	> 10.1
СБ, тыс. КОЕ/мл	< 0.1	0.1–1.0	1.1–5.0	5.1–10.0	> 10.1
ОКБ, тыс. КОЕ/л	< 0.003	0.003–2.0	2.1–10.0	11.0–100.0	> 101.0

2.4. Оценка качества воды по микробиологическим показателям

Сапробиологическую оценку воды Кижских шхер проводили по соотношению СБ/ОЧБ, %, степень загрязненности воды оценивали по шкале В.И. Романенко (1985; Дзюбан, 2000): < 0.003 – особо чистая; 0.003–0.03 – чистая; 0.03–0.1 – слабо загрязненная; 0.1–0.3 – загрязненная; 0.3–3.0 – грязная; > 3.0 – особо грязная. Класс качества воды оценивали согласно комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши по показателям ОЧБ, СБ и ОКБ (Таблица 2) (Оксиюк и др., 1993).

Для корректной оценки качества воды по показателю общей численности бактериопланктона в соответствии со шкалой В.И. Романенко (1985) и классификацией, предложенной О.П. Оксиюк с соавторами (1993) (световая микроскопия с окрашиванием клеток эритрозинном), был использован коэффициент 2.06 для пересчета на новый метод (эпифлуоресцентная микроскопия с окрашиванием клеток акридиновым оранжевым) (Макарова et al., 2022).

Интенсивность протекания процессов самоочищения оценивали по соотношению численности сапрофитных бактерий и общего микробного числа (СБ/ОМЧ) – коэффициенту самоочищения (K_c) (МУК 4.2.1884-04). K_c ниже критического уровня, равного 4, свидетельствует о присутствии потенциально патогенной микрофлоры, а также о низких скоростях самоочищения на различных участках водоема (МУК 4.2.1884-04). Степень загрязнения озерной воды нефтяными соединениями оценивали по численности УОБ, которая при превышении 5% от СБ, свидетельствует о загрязнении воды нефтепродуктами (Разумов и Корш, 1960). Степень загрязнения озерной воды фенольными соединениями оценивали согласно классификации качества пресных вод по развитию ФОБ (Виноградов и др., 2001).

Для корректного сравнения станций с разной глубиной использовали средневзвешенные показатели общей численности бактерий и численности эколого-трофических групп бактериопланктона в столбе воды.

2.5. Статистический анализ

Для сравнения выборок между собой применяли непараметрический анализ Манна – Уитни. При сравнении полученных данных с данными пре-

дыдущих исследований определяли доверительный интервал (tm) и размах варьирования показателей ($min - max$). Статистическая обработка данных осуществлялась в лицензированном пакете Statistica Advanced 10 for WindowsRu.

3. Результаты и обсуждение

Морфологическая структура бактериопланктона часто используется при оценке качества водных объектов. Известно, что палочковидные формы бактерий являются активным компонентом бактериального сообщества (Румянцева и Косолапов, 2015; Кузнецова, 2017; Kuznetsova et al., 2020).

Морфологический состав бактериопланктона в воде Кижских шхер характеризовался преобладанием палочковидных форм, что свидетельствует о наличии органических веществ (ОВ) различной природы и их деструкции, указывая на интенсивное протекание процессов самоочищения (Разумов, 1962; Шорникова, 2008; Хмелевская, 2013; Токинова и др., 2014; Богданова, 2015).

Размерная структура бактериального сообщества позволяет оценить его функциональное состояние. Обладающие интенсивным метаболизмом мелкие кокки (0.2–0.35 мкм) и крупные палочки (> 2 мкм) (Кузнецова, 2017; Kuznetsova et al., 2020), имели большую долю в бактериоценозах на ст. Z2 и ст. Z3: суммарно 10% и 15% соответственно (Рис. 4), что свидетельствует о более активном потреблении здесь бактериопланктоном ОВ из окружающей водной среды и протекании процессов самоочищения. Среднеразмерные кокки (0.35–0.45 мкм), имеющие более медленные скорости метаболических процессов по сравнению с мелкими кокками

Таблица 3. Пространственное распределение в поверхностном слое воды показателей общей численности бактерий (ОЧБ), бактериальной биомассы (ББ) и среднего объема клеток (V_{cp}) в воде Кижских шхер Онежского озера

Станции	ОЧБ, млн кл. /мл	V_{cp} , мкм ³	ББ, мг/л
Z1	2.75	0.092	0.332
Z2	3.49	0.068	0.292
Z3	2.62	0.093	0.330
Z4	3.74	0.091	0.474
Z5	3.33	0.083	0.364

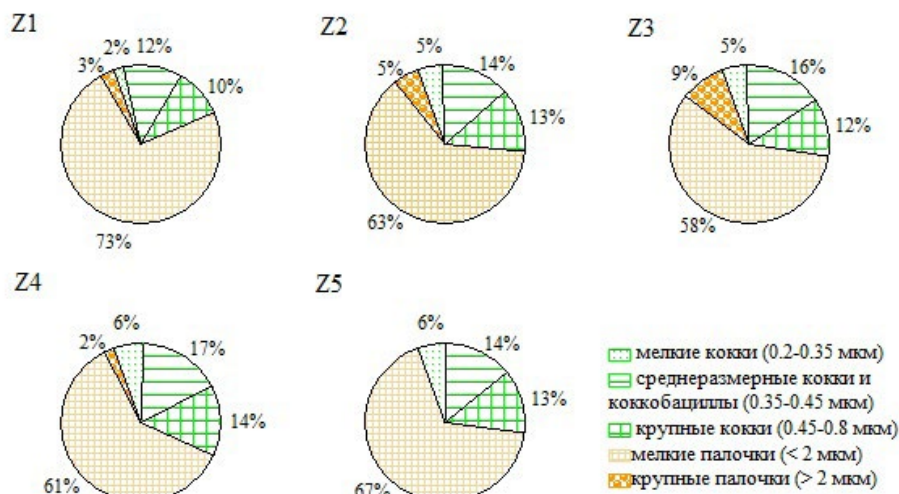


Рис. 4. Доля различных размерно-морфологических групп бактериопланктона в воде Кижских шхер Онежского озера.

(Kuznetsova et al., 2020), имели наибольшую долю на ст. Z4. Наименее активные компоненты бактериального сообщества – крупные кокки (0.45–0.8 мкм) и мелкие палочки (< 2 мкм) (Кузнецова, 2017), были характерны для ст. Z1 и ст. Z5 (суммарно 83% и 81, соответственно) (Рис.4).

В целом, размерно-морфологическая структура бактериопланктона свидетельствует о более быстром протекании процессов самоочищения на ст. Z2 и ст. Z3 в сравнении с другими станциями Кижских шхер.

Средний объем клеток на всех изученных участках Кижских шхер был сопоставим (Таблица 3). ОЧБ в поверхностном слое воды изменялась незначительно (разница между минимальным и максимальным значениями – менее чем 1.5 раза). Распределение ББ в поверхностном слое воды в основном зависел от распределения ОЧБ, однако, на ст. Z1 и Z3 – от изменений V_{cp} .

Средние показатели в столбе воды ОЧБ возле о. Кизи варьировали в узких пределах с максимальными значениями на ст. Z2 (Таблица 4). Высокие численности гетеротрофных бактерий (ГБ), являющихся доминирующей группой в микробоценозах благодаря способности к высокой скорости роста при низких концентрациях ОВ, отмечались повсе-

местно на всех изученных станциях. Наибольшее развитие ГБ характерно для западного побережья о. Кизи – ст. Z1 и Z2 (Таблица 4).

Средневзвешанные в столбе воды показатели численности сапрофитных бактерий (СБ) – индикаторов сапробности, способных развиваться при высоких концентрациях ОВ, достигала максимальных значений на ст. Z1. Коэффициент самоочищения (K_c) – отношение СБ/ОМЧ, ниже предельного значения, равного 4, свидетельствует о незавершенности процессов самоочищения на юго-западном побережье о. Кизи (ст. Z2) и о возможном наличии в данном районе условно-патогенных микроорганизмов (Таблица 4).

Важной частью исследований являлось изучение условно-патогенных микроорганизмов по количеству обобщенных колиформных бактерий (ОКБ). По количеству ОКБ судят о наличии фекального загрязнения воды и о ее безопасности для рекреационного использования. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 количество ОКБ в зонах рекреационного назначения не должно превышать 500 КОЕ/100 см³. Численность ОКБ превышала критическое значение на станциях, где отмечается застойность течения и активное судоходство: ст. Z1, ст. Z2, ст. Z4 (Таблица 4).

Таблица 4. Микробиологическая характеристика воды Кижских шхер Онежского озера (средневзвешанные значения в столбе воды), и качество воды по различным показателям.

Станция	ОЧБ	ГБ	СБ	ФОБ	УОБ	ОМЧ	ОКБ	K_c	СБ/ОЧБ, % (Романенко, 1985)	Класс качества (Оксиук и др., 1993)
	млн кл./мл									
Z1	2.30	3639	1187	559	326	119	860	5	0.11	3
Z2	3.14	2746	699	325	99	208	2580	1	0.05	3
Z3	2.13	1063	333	286	126	16	290	126	0.03	2
Z4	2.62	1411	912	127	50	116	804	4	0.07	3
Z5	2.79	1319	828	371	44	99	301	52	0.06	3

Примечание: ОЧБ – общая численность бактерий; ГБ – гетеротрофные бактерии; СБ – сапрофитные бактерии; ФОБ – фенолоксиляющие бактерии; УОБ – углеводородоксиляющие бактерии; ОМЧ – общее микробное число; ОКБ – обобщенные колиформные бактерии; K_c – коэффициент самоочищения; Жирным выделены значения ОКБ, превышающие нормы СанПиН 2.1.3685-21.

Согласно шкале качества вод В.И. Романенко (1985), вода на ст. Z3 являлась «чистой», на остальных станциях – «слабо загрязненной». В соответствии с комплексной экологической классификацией качества поверхностных вод суши (Оксиюк и др., 1993), по показателям ОЧБ, СБ и ОКБ (усредненный класс качества), вода на ст. Z3 соответствовала 2 классу качества – «чистые воды», вода на остальных станциях Кижских шхер соответствовала 3 классу качества – воды «удовлетворительной чистоты».

Индикаторами загрязнения воды фенольными соединениями являются фенолоксиляющие бактерии (ФОБ), чья численность характеризовала воду всех изученных станций вблизи о. Кизи как «удовлетворительно чистые» (3 класс качества) по классификации качества пресных вод (Виноградов и др., 2001).

Наличие нефтяных углеводородов характерно для всего района Кижских шхер в связи с активным судоходством, что обуславливает развитие углеводородоксиляющих бактерий (УОБ). Считается, что численность УОБ, превышающая 5% от СБ, свидетельствует о загрязнении воды нефтепродуктами (Разумов и Корш, 1960). Так, в среднем доля УОБ от численности СБ была наименьшей на ст. Z4 и Z5, составляя 6% и 8%, соответственно, в то время как на ст. Z1 их доля составляла 31%, на ст. Z2 – 12%, на ст. Z3 – 46%, свидетельствуя о загрязнении нефтяными углеводородами западного и восточного побережий о. Кизи. Интересно, что ст. Z3 по показателям ОЧБ, СБ, ОКБ, ОМЧ выделялась как чистый участок, по численности УОБ ситуация противоположная. Вероятно, высокие численности УОБ на ст. Z3 связаны с интенсивным движением маломерных судов, осуществляющих туристические маршруты вокруг о. Кизи.

Таблица 5. Уровни значимости U-критерия Манна – Уитни между станциями отбора проб шхерного района (ст. Z1, ст. Z2, ст. Z4) и станциями открытой части (ст. Z3, ст. Z5) Кижских шхер Онежского озера.

Показатели	Уровень значимости
ОЧБ	0.337
СБ	0.109
ГБ	0.109
ОМЧ	0.055
УОБ	0.631
ФОБ	0.749
ОКБ	0.011

Примечание: * Жирным шрифтом указаны нагрузки признаков с достоверным вкладом ($p < 0.05$)

В целом, развитие эколого-трофических групп бактериопланктонного сообщества возле о. Кизи было неравномерным. Наибольшим развитием бактериопланктона характеризовались станции на участках с замедленным водообменом – станции Z1, Z2 и Z4.

Непараметрический анализ с применением U-критерия Манна – Уитни показал статистически значимые различия численности ОКБ между шхерными участками (ст. Z1, ст. Z2, ст. Z4) и открытыми участками (ст. Z3, ст. Z5) о. Кизи. Различия по численности остальных эколого-трофических групп бактериопланктона отсутствовали (Таблица 5).

Полученные данные за летний период 2023 г. со ст. Z1–Z4 по ОЧБ и численности СБ, ГБ, УОБ и ФОБ сравнили с данными летнего периода (июнь–август) предыдущих исследований (1994–2009 гг.) (Сярки и др., 2015) (Таблица 6). Анализ данных показал, что за 2023 г. ОЧБ на ст. Z2 и ст. Z4 выходит

Таблица 6. Бактериопланктон района Кижских шхер Онежского озера в разные периоды исследований.

Показатели	Период исследований	ст. Z1	ст. Z2	ст. Z3	ст. Z4
ОЧБ, млн. кл./мл	1994–2009 гг.	<u>0.85–4.89 (4)*</u> 0–5.52	<u>0.75–3.39 (9)</u> 1.17–2.88	<u>0.72–4.78 (11)</u> 1.35–3.09	<u>0.78–2.88 (4)</u> 0–2.98
	2023 г.	2.62–3.30 (2)	3.42–3.74 (2)	2.37–2.75 (3)	3.14–3.33 (2)
СБ, КОЕ/мл	1994–2009 гг.	<u>98–644 (2)</u> 0–845	<u>114–2316 (8)</u> 0–1186	<u>8–1576 (11)</u> 53–638	<u>190–401 (4)</u> 145–470
	2023 г.	1240–1820 (2)	154–1440 (2)	361–426 (3)	710–1540 (2)
ГБ, КОЕ/мл	1994–2009 гг.	<u>338–775 (2)</u> 0–3334	<u>277–3352 (4)</u> 0–3689	<u>44–2520 (7)</u> 11–1594	<u>215–1510 (3)</u> 0–2432
	2023 г.	3770–5610 (2)	980–5280 (2)	960–1640 (3)	1500–1980 (2)
УОБ, КОЕ/мл	1994–2009 гг.	<u>86–133 (2)</u> 0–408	<u>0–786 (5)</u> 0–786	<u>18–284 (7)</u> 18–284	<u>11–216 (4)</u> 0–228
	2023 г.	221–620 (2)	14–211 (2)	69–371 (3)	52–72 (2)
ФОБ, КОЕ/мл	1994–2009 гг.	<u>8–12 (2)</u> 0–35	<u>70–1140 (4)</u> 0–1232	<u>8–132 (6)</u> 8–132	<u>77–1264 (3)</u> 0–2158
	2023 г.	640–800 (2)	81–660 (2)	300–500 (3)	147–166 (2)

Примечание: * $\frac{Min - Max(n)}{tm}$; Жирным – указаны значения показателей, выходящие за пределы доверительного интервала tm . ОЧБ – общая численность бактерий; СБ – сапрофитные бактерии; ГБ – гетеротрофные бактерии; УОБ – углеводородоксиляющие бактерии; ОМЧ – общее микробное число; ФОБ – фенолоксиляющие бактерии.

за рамки доверительного интервала данных предыдущих исследований, однако такое увеличение ОЧБ невелико. В большей степени отмечены изменения численности эколого-трофических групп бактериопланктона. Так, на ст. Z1 полученные в 2023 г. показатели выходят из доверительного интервала значений, полученных за период 1994–2009 гг. (Таблица 6). Здесь отмечается некоторое увеличение численности ГБ и УОБ, а также превышение численности на порядок СБ и ФОБ. Численности СБ и ГБ на ст. Z2 и ГБ и УОБ на ст. Z3 немногим выходят за пределы доверительных интервалов данных предыдущих исследований (Таблица 6). Также на ст. Z3 отмечается увеличение в 2–4 раза ФОБ, по сравнению с предыдущими исследованиями, а на ст. Z4 – увеличение на порядок численности СБ.

Увеличение численности эколого-трофических групп бактериопланктона доказывает, что за последние 15 лет возле о. Кижы усилилась антропогенная нагрузка связанная с увеличением туризма, влекущего за собой повышение транспортной нагрузки.

4. Выводы

В летний период 2023 г. шхерный район Онежского озера характеризовался загрязнением легкоминерализуемым ОВ, фенольными соединениями и нефтепродуктами, о чем свидетельствуют высокие показатели численности эколого-трофических групп бактериопланктона. Размерно-морфологическая структура бактерий также подтверждает наличие загрязнения воды возле о. Кижы органическим веществом, а также о его потреблении бактериями. Санитарно-бактериологическое состояние воды по микробиологическим показателям свидетельствовало о присутствии условно-патогенных микроорганизмов, определяемых по численности ОКБ, повсеместно превышающих нормативы для водоемов рекреационного использования.

Наиболее загрязненными являются станции западного побережья о. Кижы (ст. Z1 и ст. Z2), где отмечается замедленный водообмен и лучший прогрев воды. Наиболее чистый участок водного пространства о. Кижы – ст. Z3 – открытый плес с более интенсивным водообменом с центральной частью озера.

По сравнению с предыдущим периодом исследований, летний период 2023 г. характеризовался более высокими показателями численности бактериопланктона, что связано с увеличившейся туристической нагрузкой, выражающейся, в первую очередь, в увеличении судоходства.

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

Богданова О.Ю. 2015. Таксономический состав микробного населения литорали Кольского залива. *Евразийский Союз Ученых* 4-10 (13): 8–11.

Виноградов Г.А., Жариков Г.П., Березина Н.А. и др. 2001. Разработка региональной классификации качества вод на основе мониторинга р. Которосль и ее притоков. *Экологические проблемы Верхней Волги: Коллективная монография*. Ярославль, С. 210–221.

Висянская 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.

Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2022 году: информационное электронное издание. 2023. Министерство природных ресурсов и экологии Республики Карелия. В: Громцев А.Н., Каргинова-Губинова В.В., Кузнецов О.Л. и др. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Дзюбан А.Н. 2000. Бактериопланктон и микробиологическое окисление метана в воде загрязняемой малой реки. *Биология внутренних вод* 2: 65–72.

Кузнецова Е.В. 2017. Микробное сообщество прибрежных мелководий Рыбинского водохранилища в условиях влияния жизнедеятельности колониальных птиц. *Кандидатская диссертация, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина, Борок, Россия*.

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

МУК 4.2.1884-04. 2004. Методические указания «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов».

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. В: Филатов Н.Н. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижы». 2022 год. 2023. В: Базегской Е.Б. (ред.). М-во культуры Рос. Федерации, ФГБУК «Гос. историко-архитектур. и этнограф. музей-заповедник «Кижы»».- Петрозаводск: Издательский центр музея-заповедника «Кижы».

Протасов Ю.Г. 1999. Некоторые актуальные вопросы антропогенного воздействия на территории охранной зоны музея-заповедника «Кижы». *Труды КарНЦ РАН. Серия Б. «Биогеография Карелии»* 1: 126–130.

Разумов А.С., Корш Л.Е. 1960. Методы санитарно-микробиологических исследований. Приемы санитарного изучения водоемов. Москва: Медгиз. 241–312.

Разумов А.С. 1962. Микробиальный планктон воды. В: *Зенкевич Л.А. (ред.), Труды Всесоюзного гидробиологического общества: сборник статей*. 12. Москва, С. 60–190.

Романенко В.И. 1985. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоемах. Ленинград: Наука.

Румянцева Е.В., Косолапов Д.Б. 2015. Размерно-морфологическая структура и активность бактериопланктона литоральной зоны крупного равнинного водохранилища. Тезисы докладов и стендовых сообщений 23: 302.

Сабылина А.В., Ефремова Т.А., Рыжаков А.В. и др. 2012. Биогенные элементы и органическое вещество в Онежском озере и его заливах. В: Лозовик П.А. (отв. ред.), Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием, С. 75–78.

Сабылина А.В. 1999. Современный гидрохимический режим озера. В: Филатов Н.Н. (отв. ред.), Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск, С. 58–108.

СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека.

Сярки М.Т., Теканова Е.В., Чекрыжева Т.А. 2015. Планктон пелагиали Онежского озера. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620274. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН) (RU). Дата регистрации в реестре баз данных 13 февраля 2015 г.

Токинова Р.П., Абрамова К.И., Морозова О.В. и др. 2014. Сравнительная оценка качества воды в водоеме многоцелевого назначения по бактериопланктону, фитопланктону и зообентосу. *Вода: химия и экология* 9: 54–58.

Хмелевская И.А. 2013. Микробиологическая индикация загрязнения водной среды. *Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки* 3: 37–46.

Шорникова Е.А. 2008. Микробиологическая индикация состояния экосистем водотоков на нефтяных месторождениях Среднего Приобья. *Сибирский экологический журнал* 15 (3): 417–425.

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)

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

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)

Kuznetsova E.V., Kosolapov D.B., Kosolapova N.G. 2020. Taxonomic and size-morphological groups of bacterioplankton in two Mongolian reservoirs. *Biology Bulletin* 47(1): 27–34. DOI: [10.1134/S1062359019060104](https://doi.org/10.1134/S1062359019060104)

Makarova E.M., Tekanova E.V., Kalinkina N.M. 2022. Bacterioplankton Status in the Lososinka River (Tributary of Lake Onego) and the Water Quality by Microbiological Indicators. *Biology Bulletin* 49(10): 1996–2003. DOI: [10.1134/S1062359022100363](https://doi.org/10.1134/S1062359022100363)

Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Makarova E.M. et al. 2023. The current trophic state and water quality of Lake Onego. *Inland Water Biology* 16(6): 967–973.

Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. et al. 2022. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019-2021. *Data in Brief* 42: 108079. DOI: [10.1016/j.dib.2022.108079](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079)