

Trophic state of the Kizhi skerries area of Lake Onego and water quality assessment based on summer phytoplankton indicators

Smirnova V.S.

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Aleksander Nevsky Str. 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. The study of summer phytoplankton (July-August 2020 and 2022) in the Kizhi skerries area of Lake Onego revealed high quantitative indicators of phytoplankton development, which characterises this area as meso-eutrophic. The phytocenosis was characterised by high species diversity, which is typical for the summer phytoplankton community of Lake Onego. However, at the time of the study, the indicator species of β -mesosaprobic pollution zones (water quality class 3, satisfactorily clean) exhibited the greatest quantitative development. Notable species with the potential to produce cyanotoxins were observed, although their quantitative development was relatively limited. The analysis of multi-year changes revealed an increase in the abundance of cyanobacteria, green algae and euglena algae. The total biomass of phytoplankton increased as a result of the proliferation of numerous, small-celled cyanobacteria and a limited number of large-celled, benthic and planktonic-benthic diatom algal species. The marked proliferation of phytoplankton in the study area is attributable to the prevailing natural conditions. Further research is required to ascertain the precise reasons for the observed increase in phytoplankton quantities in recent years.

Keywords: phytoplankton, Kizhi Island, Lake Onego, abundance, biomass

For citation: Smirnova V.S. Trophic state of the Kizhi skerries area of Lake Onego and water quality assessment based on summer phytoplankton indicators // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - P. 30-51. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-30

1. Introduction

The Kizhi archipelago is a system of islands situated in the north-western part of Lake Onego, the second largest freshwater body of water in Europe. The Kizhi skerries are distinguished from all other areas of the lake by exceptional geological structure (Golubev, 1999; Deines, 2013). The landscape features of this territory have resulted in the formation of unique conditions for the development of not only terrestrial, but also aquatic biocenoses (Kapitonova, 2008; Deines, 2013). The development of hydrobiocenoses in this area is characterised by the presence of well-warmed shallow water and weak dynamics of water masses. Consequently, even in the earlier period of research (60-70s), this area was identified as the most productive (Vislyanskaya et al., 1999; Chekryzheva, 2008).

One of the islands of the Kizhi archipelago, Kizhi Island, is the location of the architectural ensemble of the Kizhi Pogost. The Kizhi State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve comprises 68 archi-

tectural monuments on Kizhi Island (Onego Lake, Atlas, 2010). The architectural ensemble of the Kizhi Pogost was inscribed on the UNESCO List of World Cultural Heritage Sites in 1990, becoming one of the inaugural three Russian sites to be included on the UNESCO list. From 1989 to 1997, the Reserve received an average of 65,000 to 158,000 visitors annually (Protasov, 1999). At this juncture, the Kizhi skerries area is subjected to considerable anthropogenic pressure, largely due to the impact of water transport and an increase in the volume of domestic wastewater generated by the museum-reserve and private residences. During the summer season (July-August) between 1992 and 2011, high concentrations of oil products in water, ranging from 0.15 to 0.6 mg/l, were observed (Sabylina, 1999; Protasov, 1999; Sabylina and Ryzhakov, 2007; Sabylina et al., 2012). With regard to the total phosphorus concentration in water during this period, the Kizhi skerries area was characterised as mesotrophic (up to 25 $\mu\text{g/l}$) (Galakhina et al., 2022). It is at this juncture that alterations in the phyto- and bacterioplankton of the study

*Corresponding author.

E-mail address: SmirnovaLera24@yandex.ru (V.S. Smirnova)

Received: July 10, 2024; **Accepted:** January 13, 2025;

Available online: February 26, 2025

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



area are discerned. In accordance with the degree of advancement of these biocenosis representatives, the Kizhi skerries area was also categorised as a mesotrophic region of Lake Onego (Vislyanskaya et al., 1999; Chekryzheva, 2008).

The number of tourist arrivals has increased to 360,000 per year, as indicated in the Activity Report for 2023. The highest concentration of microplastics was identified in the bottom sediments adjacent to the primary passenger pier of the Museum-Reserve 'Kizhi' (Zobkov and Efremova, 2023). However, recent hydrochemical studies conducted between 2019 and 2020 indicate a reduction in total phosphorus, nitrates, and BOD₅ levels compared to long-term data from the same region (Galakhina et al., 2022).

Phytoplankton demonstrate a rapid response to alterations in habitat conditions, thereby enabling the determination of the trophic status and sanitary condition of water bodies (Abakumov, 1977; Reynolds, 2008; Parmar et al., 2016). The objective of this study is to evaluate the present condition of the surrounding area of the Kizhi Museum-Reserve, with particular attention to water quality and trophic status, employing quantitative and structural indicators of summer phytoplankton.

2. Materials and methods of research

In July and August of 2020 and 2022, four water samples were collected at two stations in the Kizhi Skerries region of Lake Onego for the purpose of analysing the phytoplankton present in the surface layer (0.5 m). Station Z_2 (5 m depth) is situated in close proximity to the water transport pier on Kizhi Island, where the Kizhi Museum-Reserve is located. Station Z_3 (10 m depth) is located on the eastern side of the island (Figure 1).

Water samples of 500 ml were taken with a Ruttner bathometer and fixed with 10 ml of 40% formalin. They were then concentrated on membrane filters (pore diameter 0.8 µm) to a volume of 5ml, in accordance with the methodology described by Kuzmin (1975) and Fedorov (1979). The identification of spe-

cies was conducted in accordance with the criteria set forth by Zabelina et al. (1951), Matvienko (1954), Tikkanen (1986), and the "Freshwater Algae of..." reference (2015), utilizing a Mikmed-6 microscope at 400x magnification. The species diversity of the phytoplankton community was assessed by the Shannon-Weaver (H) index (Shannon and Weaver, 1949), the uniformity of species distribution in the community by the Pieluequalization index (E) (Odum, 1986). Species with abundance and/or biomass greater than 10% were categorized as dominant species, and species with abundance and/or biomass greater than 5% were categorized as subdominants species. Ecological and geographical characteristics and indicator significance of phytoplankton species were determined according to the methodology (Makrushin, 1974; Vasser et al., 1989; Barinova et al., 2006). The water saprobic index was calculated in accordance with the Pantle-Buck method, modified by Sladeczek (Sladeczek, 1973). The zone of water saprobity was determined in accordance with the established ecological classification of surface waters (Oksiyuk et al., 1993). To analyse modern phytoplankton data with long-term data, we utilised the registered database (Syarki et al., 2015) and Spearman's rank correlation coefficient, performed in Statistica Advanced 10 for Windows Ru package. The water surface temperature during the study period was measured using a CastAway-CTD device and compared with the recorded temperature data using a confidence interval (Kalinkina et al., 2023).

3. Results and discussion

The phytoplankton composition in the Kizhi skerries area at the time of the survey included 105 taxa, including 97 algal taxa ranked below the genus, 8 taxa ranked up to the genus, belonging to 7 systematic divisions: Bacillariophyta - 38 (36.2%), Chlorophyta - 29 (27.6%), Cyanobacteria - 16 (15.2%); Chrysophyta - 15 (14.3%); Euglenophyta - 3 (2.9%); Cryptophyta - 1 (1%), Dinophyta - 3 (2.8%) (Table 1). The species composition of phytoplankton is typical for the phytocenosis of Lake Onego (Chekryzheva, 2012).

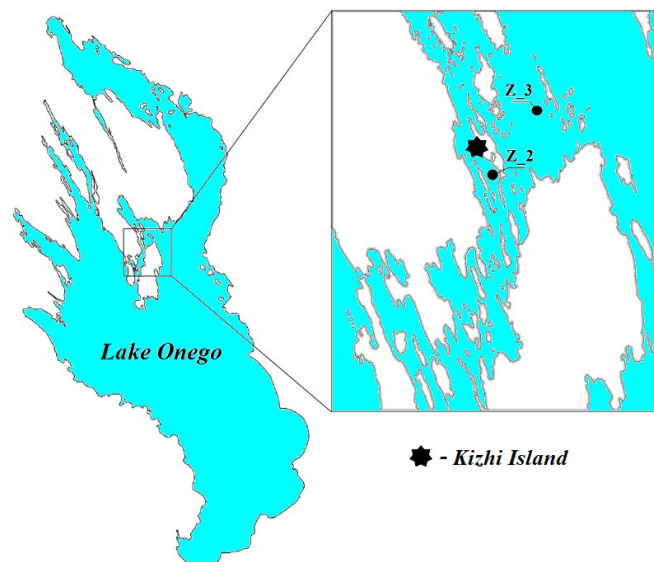


Fig.1. Location map of phytoplankton sampling stations in the area of Kizhi skerries of Lake Onego.

Table 1. Occurrence of summer phytoplankton species at water sampling stations in the area of Kizhi skerries of Lake Onego

№	Species composition	Stations	
		Z_2	Z_3
Cyanobacteria			
1	<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv.	+	+
2	<i>Merismopedia punctata</i> Meyen.	+	-
3	<i>Aphanocapsa elachista</i> var. <i>elachista</i> W. et G. S. West	+	+
4	<i>Aphanothece clathrata</i> W. et G.S. West f. <i>clathrata</i>	+	+
5	<i>Gloeocapsa limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. (= <i>Croococcus limneticus</i> Lemm.)	+	+
6	<i>Gloeocapsa magma</i> (Bréb.) Kütz. emend Hollerb.	-	+
7	<i>Gloeocapsa minima</i> (Keissl.) Hollerb. ampl. f. <i>minima</i>	+	-
8	<i>Gloeocapsa minor</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Croococcus minor</i> (Kütz.) Näg.)	+	-
9	<i>Gloeocapsa minor</i> f. <i>dispersa</i> (Keissler) Hollerbach	+	+
10	<i>Gloeocapsa punctata</i> Näg. emend. Hollerb.	+	+
11	<i>Gloeocapsa turgida</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Chroococcus turgidus</i> (Kütz.) Näg.)	+	-
12	<i>Gloeocapsa vacuolata</i> (Skuja) Hollerb.	+	+
13	<i>Gloeocapsa varia</i> (A. Br.) Hollerb.	-	+
14	<i>Gomphosphaeria lacustris</i> Chod. (= <i>Snowella lacustris</i> (Chod.) Kom. et Hind.)	+	+
15	<i>Oscillatoria planctonica</i> Wolosz. (= <i>Limnothrix planctonica</i> (Wolosz.) Meffert	+	-
16	<i>Gloeocapsa</i> sp.	-	+
Cryptophyta			
17	<i>Cryptomonas erosa</i> Ehr.	+	-
Dinophyta			
18	<i>Glenodinium edax</i> Schilling.	+	-
19	<i>Peridinium cinctum</i> (Müll.) Ehrb.	+	-
20	<i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müll.) Schrank	+	+
Chrysophyta			
21	<i>Chrysococcus cordiformis</i> Naum.	+	-
22	<i>Chrysococcus rufescens</i> Klebs. var. <i>rufescens</i>	+	-
23	<i>Kephyrion ovum</i> Pascher	+	-
24	<i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof var. <i>bavaricum</i>	+	+
25	<i>Dinobryon divergens</i> Imhof.	+	+
26	<i>Dinobryon sertularia</i> Ehr.	+	+
27	<i>Dinobryon sociale</i> Ehr.	+	-
28	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i> (Stein) Lemm.	+	+
29	<i>Dinobryon suecicum</i> Lemm.	+	+
30	<i>Pseudokephyrion entzii</i> Corn.	+	+
31	<i>Mallomonas caudate</i> Iwan. Senu Krieger	+	-
32	<i>Mallomonas coronata</i> Boloch.	-	+
33	<i>Mallomonas fressenii</i> Kent.	+	-
34	<i>Bitrichia chodatii</i> (Reverdin) Chodat.	-	+
35	<i>Chrysopyxis urna</i> Korsch.	-	+
Bacillariophyta			
36	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.	-	+
37	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz. (= <i>C. kuetzingiana</i>)	+	+
38	<i>Cyclotella schumannii</i> (Grun.) Håkansson (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>schumannii</i> Grun.)	+	-
39	<i>Discostella stelligera</i> (Cleve et Grunow) Houk et Klee	+	+
40	<i>Puncticulata bodanica</i> (Grun.) Håkansson	+	+

№	Species composition	Stations	
		Z_2	Z_3
41	<i>Puncticulata comta</i> (Ehr.) Håkansson.	+	+
42	<i>Puncticulata radiosa</i> (Lemm.) Håkansson	+	+
43	<i>Melosira varians</i> Ag.	+	-
44	<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Sim. (= incl. <i>f. curvata f. islandica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica ssp. helvetica</i> O. Müll. (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica ssp. helvetica</i> O. Müll.	+	+
45	<i>Aulacoseira granulate</i> (Ehr.) Sim.	+	+
46	<i>Aulacoseira italica</i> (Ehr.) Kütz. <i>f. italica</i>	+	+
47	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Sim.	-	+
48	<i>Fragilaria constricta</i> Ehr. <i>f. constricta</i>	+	-
49	<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt.	+	+
50	<i>Fragilaria pinnata</i> Ehr.	+	-
51	<i>Synedra acus</i> Kütz. <i>ssp. acus</i>	-	+
52	<i>Asterionella formosa</i> Hass. <i>var. formosa</i>	+	+
53	<i>Diatoma tenuis</i> Ag. (= <i>D. elongatum</i> (Lyngb.) Ag.)	+	-
54	<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.	+	+
55	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz. (incl. <i>var. ventricosa</i> Grun.)	+	-
56	<i>Navicula dicephala</i> (Ehr.) W. Sm.	+	-
57	<i>Navicula longirostris</i> Hust.	+	-
58	<i>Navicula rotaeana</i> (Rabenh.) Grun.	+	-
59	<i>Navicula salinarum f. capitata</i> Schulz	+	+
60	<i>Diploneis smithii</i> (Bréb.) Cl. <i>var. smithii</i>	+	-
61	<i>Frustulia rhomboides var. saxonica</i> (Rabenh.) D. T.	-	+
62	<i>Cymbella lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. <i>var. lanceolata</i> (incl. <i>var. notata</i> Wisl. et Poretzky)	+	-
63	<i>Cymbella ventricosa</i> Kütz. <i>var. ventricosa</i>	+	-
64	<i>Amphora coffeaformis</i> (Ag.) Kütz. <i>var. coffeaformis</i>	+	-
65	<i>Amphora ovalis</i> (Kütz.) Kütz. (incl. <i>var. gracilis</i> (Ehr.) Cl.)	+	-
66	<i>Amphora pediculus</i> (Kütz.) Grun. (= <i>A. ovalis var. pediculus</i> (Kütz.) V.H.)	+	-
67	<i>Nitzschia acicularis</i> (Kütz.) W. Sm.	+	-
68	<i>Nitzschia angustata</i> (W. Sm.) Grun. <i>var. angustata</i>	+	-
69	<i>Nitzschia dissipata</i> (Kütz.) Grun.	+	-
70	<i>Nitzschia hungarica</i> Grun.	+	-
71	<i>Nitzschia tryblionella var. levidensis</i> (W. Sm.) Grun.	+	+
72	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. (incl. <i>var. costatum</i> (W. Sm.) Grun.)	-	+
73	<i>Cyclotella sp.</i>	-	+
Euglenophyta			
74	<i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr. <i>var. volvocina</i>	+	+
75	<i>Trachelomonas volvocina var. subglobosa</i> Lemm. <i>sens. Swir.</i>	+	-
76	<i>Trachelomonas sp.</i>	+	-
Chlorophyta			
77	<i>Chlamydomonas globosa</i> Snow.	+	+
78	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> P.A. Dang.	+	+
79	<i>Lobomonas stellate</i> Chod.	+	+
80	<i>Eudorina elegans</i> Ehr.	+	-
81	<i>Pediastrum duplex</i> Meyen.	+	-
82	<i>Coenococcus planctonicus</i> Korschik.	+	+

№	Species composition	Stations	
		Z_2	Z_3
83	<i>Chlorella vulgaris</i> Beyer. var. <i>vulgaris</i>	-	+
84	<i>Oocystis elliptica</i> W. Sm.	-	+
85	<i>Oocystis lacustris</i> Chod.	+	+
86	<i>Oocystis submarina</i> Lagerh.	+	-
87	<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komark-Legn.	+	+
88	<i>Coelastrum cambricum</i> Arch.	+	-
89	<i>Coelastrum sphaericum</i> Näg.	-	+
90	<i>Crucigenia quadrata</i> Morren.	+	+
91	<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchn.) W. et G. West.	+	+
92	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Bréb.	+	-
93	<i>Kirchneriella contorta</i> (Shmiddle) Bohl.	+	+
94	<i>Koliella spiculiformis</i> (Vischer) Hind.	+	+
95	<i>Ulothrix zonata</i> (Web. et. Mohr.) Kütz. var. <i>zonata</i>	+	-
96	<i>Gloeotila spiralis</i> Chod.	+	+
97	<i>Closterium gracile</i> Bréb. var. <i>gracile</i>	+	-
98	<i>Closterium pusillum</i> Hantzsch.	+	+
99	<i>Staurastrum paradoxum</i> Meyen.	+	+
100	<i>Ankyra juday</i> (G. M. Smith.) Fott.	-	+
101	<i>Chlamydomonas</i> sp.	-	+
102	<i>Coenococcus</i> sp.	+	-
103	<i>Monodus</i> sp.	+	+
104	<i>Stigeoclonium</i> sp.	-	+
105	<i>Ulothrix</i> sp.	+	-

The phytoplankton of the Kizhi skerries area were found to be dominated by cosmopolitan (84.5%) and boreal (8.2%) species, as detailed in Table 2. The community was found to comprise mainly planktonic (58.8%), planktonic-benthic (15.6%) and benthic forms (15.6%) (see Table 2). In terms of salinity, the community species were represented by indifferent species (59.8%), oligohalobes (12.4%), oligohalob-halophiles (12.4%) and oligohalob-halophobes (7.2%) (see Table 2), which is typical for a water body of such low salinity as Lake Onego (Lakes of Karelia, 2013). With regard to the acidity of the aquatic environment, the largest proportion were indifferent species (50.5%), alkalophilic species that prefer slightly alkaline waters (28.9%) and the smallest proportion were acidophilic species that are capable of living in highly acidic conditions (10.3%) (see Table 2).

In the present (2020 and 2022), the dominant complex in terms of biomass (B) consists of large species of Bacillariophyta ($V_{\text{cells}} < 72250 \mu\text{m}^3$), Dinophyta ($V_{\text{cells}} < 19000 \mu\text{m}^3$) and Chrysophyta ($V_{\text{cells}} < 1376 \mu\text{m}^3$) (Table 3). The subdominant species were represented by the phyla Chrysophyta and Bacillariophyta (see Table 3).

The dominant species in terms of abundance (N) were mainly small celled Cyanobacteria ($V_{\text{cells}} < 9 \mu\text{m}^3$) and larger Chrysophyta ($V_{\text{cells}} < 1376 \mu\text{m}^3$) (see

Table 2). Subdominants species were represented by Cyanobacteria, Chrysophyta and Chlorophyta (see Table 2).

The phytoplankton community during the study period exhibited high species diversity, as indicated by the H index, which ranged from 3.24 to 3.97 in abundance and from 2.63 to 4.03 in biomass. The equalization index E exhibited fluctuations between 1.97 and 2.19 in abundance and between 1.63 and 2.23 in biomass, indicative of a uniform distribution of species within the phytocenosis.

One of the key indices employed to evaluate the extent of organic pollution in aquatic ecosystems is the saprobic index (Barinova et al., 2006). During the study period, the algocenosis was predominantly composed of indicator species of oligosaprobic (31.6%), o-β-mesosaprobic (33.7%) and β-mesosaprobic (28.9%) pollution zones. Indicator species of highly polluted waters with organic matter – *Chlorella vulgaris* var. *vulgaris* at stations Z_2 and Z_3 and *Stephanodiscus hantzschii* at station Z_3 (p-α-saprobionts) were detected (Table 4). Oligosaprobic, o-b-mesosaprobic and b-mesosaprobic were the most quantitatively abundant at both study stations (see Table 4).

As a result of the analysis of saprobic characteristics of phytoplankton species found in the area of Kizhi skerries of Lake Onego at the time of the study

Table 2. Ecological and geographical characterization of summer phytoplankton in the Kizhi skerries area of the northwestern part of Lake Onegoin July-August in 2020 and 2022

Indicators	Number of species	% of total number of species
Spreading		
Cosmopolitans	82	84.5
Boreal	8	8.2
Alpine	1	1.1
Nodata	6	6.2
Habitat		
Planktonic	57	58.8
Benthic	15	15.6
Planktonic-benthic	15	15.6
Littoral	1	4
Foulingin habitants	4	1
Epibionts	1	1
Nodata	4	4
Halobicity		
Indifferents	58	59.8
Oligohalobes	12	12.4
Oligohalob-halophiles	12	12.4
Oligohalob-halophobes	7	7.2
Mesohalobes	3	3.1
Nodata	5	5.1
Relation to pH		
Indifferents	49	50.5
Alkaliphiles	28	28.9
Acidophiles	10	10.3
Nodata	10	10.3

and calculation of the saprobic index (1.61 ± 0.09) (see Table 4), this type of water can be classified as β -mesosaprobic (water quality class 3, satisfactorily clean).

Among the cyanobacteria in the study area, species potentially capable of producing cyanotoxins dangerous to human and animal health and life were noted – *Oscillatoria planctonica* (= *Limnothrix planctonica*) (Somdee et al., 2013; Oliveira et al., 2019), *Aphanocapsa elachista* var. *elachista* (Krienitz et al., 2013), *Merismopedia punctate* (Ribeiro et al., 2017), *Synechocystis aquatilis* (Magalhaes et al., 2003), *Gomphosphaeria lacustris* (= *Snowella lacustris*) (Echenique et al., 2014). The mean number of cells per millilitre was 990 cells/ml at the studied stations. At Station Z_2, the mean number of potentially harmful species was 584 cells/ml, with the highest concentration observed on the eastern side of the island at Station Z_3 (1640 cells/ml) (see Fig. 1). In accordance with the threshold value for dangerous cyanobacteria content (20,000 cells/ml), capable of producing cyanotoxins, established by the World Health Organization (WHO) (Guidelines for..., 2003), the quantity of potentially hazardous cyanobacteria identified in the examined water region does not pose a threat to human or animal health and life.

During the summer months of 2020 and 2022, a notable increase in microalgal biomass was observed in the study area. The total abundance (N_{tot}) was found to be 7134.4 ± 1097.14 thousand cells/l, with a total biomass (B_{tot}) of phytoplankton of 3.685 ± 1.25 mg/l. The trophic status of the summer phytoplankton indices during the study period was characterised as meso-eutrophic (Kitaev, 2007) (Table 5). The highest biomass and abundance indices were observed at station Z_3 (see Fig. 1), particularly in 2022 (see Table 5).

At the time of the study, Cyanobacteria (43.3-76.6%) and Chrysophyta (8-40.3%) dominated the phytocenosis in terms of abundance. Bacillariophyta (5-12%), Chlorophyta (5.8-14.4%) and Dinophyta, Cryptophyta, Euglenophyta were present in the least abundance (no more than 2% in terms of numbers) (Fig. 2a).

The greatest contribution to biomass was made by Chrysophyta (37.4-60%), Bacillariophyta (24-43.8%) and Dinophyta (1.1-16.5%) (Fig. 2b). The remaining microalgal divisions were represented in the lowest biomass quantities (Chlorophyta 1.4-7.2%; Cryptophyta, Euglenophyta, Cyanobacteria - not exceeding 5%) (see Fig. 2b).

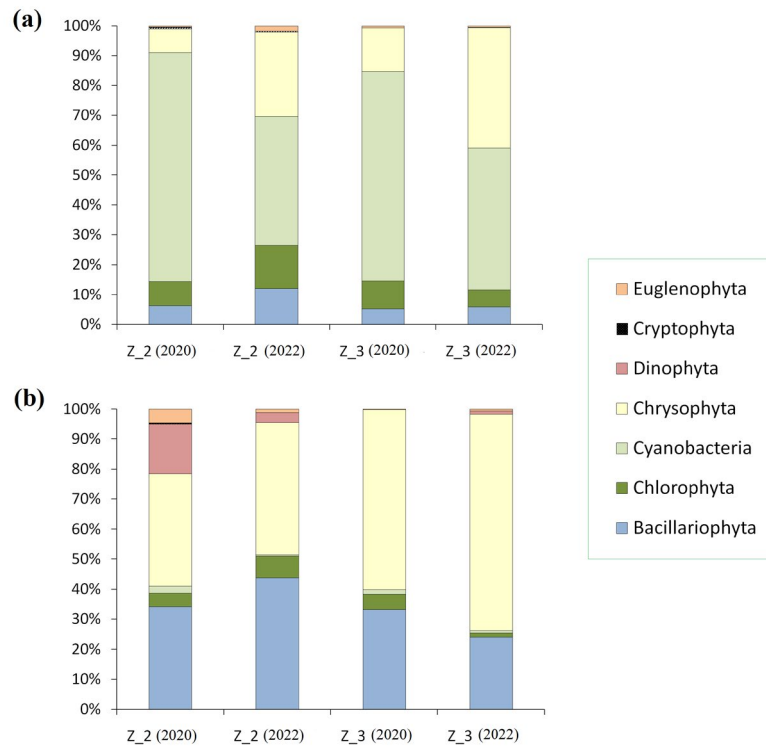


Fig.2. Ratio of different phytoplankton groups in the Kizhi skerries area of Lake Onego in summer (2020 and 2022): (a) - by abundance, (b) - by biomass.

A comparative analysis of phytoplankton indicators in the Kizhi skerries area, based on earlier studies conducted between 1996 and 2010 and more recent studies carried out in 2020 and 2022, revealed an increase in N_{tot} and B_{tot} , which was accompanied by a decline in the abundance of certain phytoplankton groups (Table 6). Earlier in the summer period, the study area was characterised by an abundance of small-celled species of the genus Chlorococcales and Chrysophyta (Chekryzheva, 2008). Nevertheless, the study revealed a statistically significant increase in cyanobacteria, green algae and euglena algae. The Spearman rank correlation coefficient between the number of cyanobacteria (N_{cyan}) and the year of study (1996-2022) was 0.65 ($p < 0.05$). The correlation between the number of green (N_{chl}) and euglena (N_{eug}) algae and the year of

study was 0.82 ($p < 0.05$, $n = 10$) and 0.67 ($p < 0.05$, $n = 10$), respectively (see Table 6), resulting in an increase in N_{tot} micro algae ($p = 0.71$, $n = 10$).

The rise in the number of algae groups observed above, which are reliable indicators of organic pollution (Algae causing..., 2006), may be regarded as an indicator of the present anthropogenic load in the water areas of the Kizhi archipelago. However, the total phosphorus content in the study area (7-13 $\mu\text{g/L}$) is consistent with the presence of this element in the central lake shoulder (Zobkov et al., 2022). It is noteworthy that the area of Kizhi skerries is characterised by a high density of aquatic vegetation, which has the potential to compete with phytoplankton for nutrients or impede algal growth through the release of allelopathic substances (Semenchenko, 2014).

Table 3. Dominant and subdominant species of summer phytoplankton in the area of Kizhi skerries of Lake Onego during the study period

Indicator	Dominant species	Subdominant species
N (thousand cells/l)	<i>Aphanocapsa elachista</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Gomposphaeria lacustris</i> Chod. ^{Cyan} <i>Aphanothece clathrata</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Dinobryon sociale</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon suecicum</i> Lemm. ^{Chry}	<i>Aphanothece clathrata</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry} <i>Pediastrum duplex</i> Meyen. ^{Chl}
B (mg/l)	<i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry} <i>Dinobryon sociale</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon suecicum</i> Lemm. ^{Chry} <i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz. ^{Bac} <i>Melosira varians</i> Ag. ^{Bac} <i>Cymbella lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. ^{Bac} <i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müll.) Schrank ^{Din}	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Sim. ^{Bac} <i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt. ^{Bac} <i>Dinobryon sertularia</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry}

Note: Superscript designations of departmental affiliation: ^{Bac} – Bacillariophyta; ^{Chl} – Chlorophyta; ^{Cyan} – Cyanobacteria; ^{Chry} – Chrysophyta; ^{Din} – Dinophyta

Table 4. Number of indicator species (N_{ind}) of water saprobity and their share in phytoplankton abundance (%) in the Kizhi Skerries area in July-August 2020 and 2022

Saprobity	StationZ_2				StationZ_3			
	2020		2022		2020		2022	
	N_{ind}	%	N_{ind}	%	N_{ind}	%	N_{ind}	%
x-saprobies	–	–	–	–	–	–	–	–
x-o-saprobies	1	0.2	1	0.1	–	–	–	–
o-saprobies	10	10.1	11	19.8	5	3.0	9	35.7
o-b-mesosaprobies	13	22.1	14	35.8	8	27.8	9	27.8
o- α -mesosaprobies	2	0.5	1	1.1	–	–	1	0.4
b-mesosaprobies	17	64.1	18	32.6	12	58.8	11	32.4
β - α -mesosaprobies	1	0.2	1	0.1	–	–	1	0.1
α -mesosaprobies	1	0.4	5	0.8	1	0.4	1	0.1
p- α -saprobies	1	0.4	–	–	2	0.4	–	–
p-saprobies	–	–	–	–	–	–	–	–
Saprobic index	1.82		1.45		1.72		1.45	

Note: "–" the presence of indicator species within the phytocenosis is currently undetected.

Only non-large ($V_{cells} < 9 \mu\text{m}^3$) but abundant cyanobacteria (B_{cyan}) ($p=0.68$, $n=10$) and large but low abundance diatoms (B_{bac}) ($p=0.76$, $n=10$) affected the statistically significant increase in phytoplankton B_{tot} ($p=0.76$, $n=10$) (see Table 5). The diatom complex included large-celled benthic (*Nitzschia hungarica*, *Cymbella lanceolata* var. *lanceolata*, *Frustulia rhomboids* var. *saxonica*, *Diploneis smithii* var. *smithii*) and planktonic-benthic species (*Melosira varians*, *Acanthoceras zachariasii*) with cell volumes ranging from 4160 to 72250 μm^3 . The increase in total biomass was not affected by the increased abundance of euglena and green algae, as smaller species were observed during the study period. During the study period (2020 and 2022), the euglena algae were dominated by *Trachelomonas volvocina* var. *volvocina* and *Trachelomonas volvocina* var. *subglobosa*, with cell volumes not exceeding 1609 μm^3 . Among the green algae, various species of the order Chlorococcales were dominant, with sizes ranging mainly from 143-496 μm^3 .

In general, the Lake Onego ecosystem has remained static throughout the period from 1992 to 2022. With regard to chlorophyll *a* and saprophytic bacteria, the trophic status of the central deep-water channel of Lake Onego remains at the level of oligotrophy, characterised by excellent water quality (Tekanova et al., 2023). The trophic level in the littoral zone of Lake Onego remains oligotrophic in terms of summer

phytoplankton (Chekryzheva, 2008; Chekryzheva and Kalinkina, 2016). Two areas with a higher trophic level merit particular mention. The first is Kondopoga Bay, where the source of pollution is a pulp and paper mill situated in the upper part of the bay and trout farms in its central section. The second is the Kizhi skerries area.

Despite the increase in small-cell, more productive forms of algae (Gutelmacher, 1986), an analysis of a comparison of chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations in the Kizhi skerries area of Lake Onego of previous studies (Chl *a* = 3.4 ± 0.3 - 1992-2010) with more recent ones (Chl *a* = 4.6 ± 0.7 - 2016-2022) demonstrated that there were no significant differences (Tekanova et al., 2023). The surface layer temperature in 2020 (17.4-18.0°C) was within the range of multiyear variability observed for this parameter in August in the study area (Onego Lake Atlas, 2010; Kalinkina et al., 2023). However, the surface temperature in 2022 reached 21-22°C, which was outside the confidence interval ($p < 0.05$, $n = 12$) in comparison to earlier observations of this indicator (1996-2017) (Kalinkina et al., 2023). It is conceivable that a more pronounced warming of the surface water layer may have resulted in a more pronounced phytoplankton growth in 2022 (Winder and Sommer, 2012). Further research is required to ascertain the precise causes of the observed increase in phytoplankton quantities during the study period.

Table 5. A quantitative analysis of phytoplankton development in the Kizhi skerries area during the summer months of 2020 and 2022.

Station	Selection time	N_{tot} (thousand cells/l)	B_{tot} (mg/l)	Trophic state
Z_2	Year 2020	6900	1.662	α -mesotrophic
Z_3		7012.5	2.183	β -mesotrophic
Z_2	Year 2022	4637.5	3.684	β -mesotrophic
Z_3		9987.5	7.210	α -eutrophic

Table 6. Statistical characteristics of phytoplankton of the Kizhi skerries area in the early (1996-2010*) and modern study periods (2020 and 2022)

Phytoplankton indicators	Early observations		Current observations	
	M ± m	<u>Min</u> max	M ± m	<u>Min</u> max
N _{tot} (thousand cells/l)	1016.1 ± 437.98	<u>5</u> 2930	7134.4 ± 1097.14	<u>4637.5</u> 9987.5
N _{cyan} (thousand cells/l)	456.4 ± 417.80	<u>2.5</u> 2125	4239.1 ± 752.73	<u>2006.3</u> 5287.5
N _{chl} (thousand cells/l)	95.3 ± 25.58	<u>29</u> 167.5	617.2 ± 28.11	<u>562.5</u> 668.8
N _{eug} (thousand cells/l)	8.8 ± 1.25	7.5 10	51.6 ± 11.52	<u>25</u> 81.3
B _{tot} (mg/l)	0.729 ± 0.24	<u>0.013</u> 1.618	3.685 ± 1.25	<u>1.662</u> 7.210
B _{cyan} (mg/l)	0.016 ± 0.01	<u>0.0002</u> 0.03	0.033 ± 0.01	<u>0.013</u> 0.048
B _{bac} (mg/l)	0.512 ± 0.22	<u>0.011</u> 1.548	1.157 ± 0.3	<u>0.564</u> 1.730

Note: M ± m – mean value and its error; min/max – minimum and maximum values

*- according to Syarki et al. (2015).

The distinctive natural conditions that prevail in the vicinity of the Kizhi skerries of Lake Onego, in comparison to other regions of the lake, foster a more robust phytoplankton growth during the summer season. However, with the increase of anthropogenic impact and climate change, more significant alterations to the phytocenosis of the study area are likely.

4. Conclusions

The study of summer phytoplankton in the Kizhi skerries area of Lake Onego in July-August 2020 and 2022 revealed an intensive development of summer phytoplankton. The species composition was consistent with that of the Lake Onego phytocenosis, but the greatest quantitative development was observed in the indicator species of β -mesosaprobic pollution zones (water quality class 3, satisfactorily clean). Furthermore, the presence of potentially harmful species with the capacity to produce cyanotoxins was observed. However, there was only a minimal quantitative development, from 584 to 1640 kl/l. A comparison with earlier studies (1996-2010) revealed an increase in the quantitative indicators of phytoplankton development in recent years (N_{max} up to 9987.5 thousand cells/l; B_{max} up to 7.210 mg/l). An increase in cyanobacteria, green algae and euglena algae, which are among the principal indicators of the process of eutrophication of water bodies, was observed. The total biomass increased due to the proliferation of numerous, small-celled cyanobacteria and a significant number of large-celled benthic and planktonic-benthic diatom species. The study area was found to exhibit characteristics of meso-eutrophic conditions.

Despite the observed increase in tourist activity, as well as the potential rise in domestic wastewater, the nutrient status of the local section of the Kizhi skerries of Lake Onego remains at the level of oligotrophy. The

observed increase in quantitative phytoplankton indicators in 2022 may be attributed to enhanced warming of the surface water layer. To ascertain the precise reasons for the increase in microalgae in recent years, further research is required.

Acknowledgements

The study was funded through Russian Science Foundation grant № 23-17-20018, <https://rscf.ru/project/23-17-20018/>, implemented in collaboration with Republic of Karelia authorities with funding from the Republic of Karelia Venture Capital Fund.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Abakumov V.A. 1977. Water quality control by hydrobiological indicators in the system of the Hydrometeorological Service of the USSR. In: Abakumov V.A. (ed.), Scientific basis for monitoring the quality of surface waters based on hydrobiological indicators. Proceedings of the Soviet-English Seminar. Leningrad, pp. 93–99. (in Russian)
- Algae causing “blooms” in water bodies of North-West Russia. 2006. In: Vinogradova K.L. (ed.) Moscow: Scientific Publications Association KMK. (in Russian)
- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Biodiversity of environmental indicator algae. Tel Aviv: Pilies Studio. (in Russian)
- Chekryzheva T.A. 2008. Phytoplankton as a component of the bioresource base of the lake. In: Kukharev V.I., Lukin A.A. (eds.), Bioresources of Lake Onego. Petrozavodsk, pp. 24–36. (in Russian)
- Chekryzheva T.A. 2012. Taxonomic and ecological characterization of phytoplankton of Lake Onego. Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk

[Proceedings of the Karelian Scientific Center of the RAS] 1: 56–69. (in Russian)

Chekryzheva T.A., Kalinkina N.M. 2016. Structure and seasonal dynamics of phytoplankton communities in the open and closed littoral of Lake Onega (Pinguba, Pukhtinskaya Bay). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 12: 83–95. (In Russian)

Deines Y.E. 2013. Geological structure of Kizhi Island according to geophysical data. In: Proceedings of the XXIV Youth Scientific Conference in memory of K.O. Kratz, Corresponding Member of the USSR Academy of Sciences "Actual problems of geology, geophysics and geoecology of northwest Russia". Apatity, October 7-10, 2013. Apatity: K & M Publishing House, pp. 43–45. (in Russian)

Echenique R.O., Aguilera A., Giannuzzi L. 2014. Problems on drinking water related to toxigenic Cyanobacteria: some cases studied in Argentina. *Advances in Limnology* 65: 431–444.

Fedorov V.D. 1979. On methods of studying phytoplankton and their activity. Moscow: Nauka. (in Russian)

Freshwater algae of North America. Ecology and Classification. 2015. In: Wehr J.D., Sheath R.G., Kociolek J.P. (ed.). Elsevier.

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 and Management* 17: 1–14.

Golubev A.I. 1999. The geological structure of the area comprising the Kizhi Skerries Wildlife Refuge is as follows. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Ser. «Biogeografiya Karelii»* [Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the RAS. Series: 'Biogeography of Karelia'] 1: 4–10. (in Russian)

Guidelines for safe recreational water environments. 2003. Vol. 1. Coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization.

Gutelmacher B.L. 1986. Metabolism of plankton as a whole: Trophometabolic interactions of zoo- and phytoplankton. Leningrad: Nauka.

Kalinkina N.M., Tekanova E.V., Syarki M.T. et al. 2023. Limnological indicators of the Onego Lake and Vygozero reservoir condition: water temperature, chlorophyll a concentration, phytoplankton production. Certificate of state registration of the database No. 2023621189. Right holder: Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Centre 'Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences' (RU). Date of registration in the register of databases: 12 April 2023. (in Russian)

Kapitonova S.A. 2008. Kizhi: Environmental Problems. In: Regerand T.I., Kukharev V.I., Filatov N.N. et al. (eds.), *Aquatic environment: integrated approach to study, protection and use*. Petrozavodsk, pp. 108–112. (in Russian)

Kitaev S.P. 2007. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (in Russian)

Krienitz L., Dadheech P.K., Fastner J. et al. 2013. The rise of potentially toxin producing cyanobacteria in Lake Naivasha, Great African Rift Valley, Kenya. *Harmful Algae* 27: 42–51.

Kuzmin G.V. 1975. Phytoplankton. Methods of studying biogeocenoses of inland water bodies. In: Mordukhai-Boltovskaya F.D. (ed.). Moscow, pp. 73–84. (in Russian)

Lake Onego. Atlas. 2010. In: Filatov N.N. (ed.). Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (in Russian)

Lakes of Karelia. Reference book. 2013. In: Filatov N.N., Kukharev V.I. (eds.). Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (in Russian)

Magalhaes V.D., Marinho M.M., Domingos P. et al. 2003. Microcystins (cyanobacteria hepatotoxins) bioaccumulation in fish and crustaceans from Sepetiba Bay (Brasil, RJ). *Toxicon* 42(3): 289–295.

Makrushin A.V. 1974. Bibliographic index on the topic "Biological analysis of water quality" with an appendix of the list of pollution indicator organisms. Leningrad: Nauka. (in Russian)

Matvienko A.M. 1954. Golden algae. Definitel of freshwater algae of the USSR. Issue 3. Moscow: Sovetskayanauka. (in Russian)

Odum Yu. 1986. Ecology: in 2 vols. Vol. 1. Moscow: Mir. (in Russian)

Oksiyuk O.P., Zhukinsky V.N., Braginsky L.P. et al. 1993. Integrated ecological classification of the quality of surface waters of land. *Gidrobiologicheskij zhurnal* [Hydrobiological journal] 29(4): 62–76. (in Russian)

Oliveira E.D.C., Castelo-Branco R., Silva L. et al. 2019. First detection of microcystin-LR in the amazon river at the drinking water treatment plant of the municipality of Macapá, Brazil. *Toxins* 11(11): 669.

Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in life science* 9(2): 110–118.

Protasov Yu.G. 1999. Nekotory'e aktual'ny'e voprosy antropogennogo vozdejstviya na territorii oxrannoj zony muzeya-zapovednika «Kizhi». *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Ser. «Biogeografiya Karelii»* [Some topical issues of anthropogenic impact on the territory of the protection zone of the museum-reserve 'Kizhi']. Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the RAS. Ser. 'Biogeography of Karelia] 1: 126–131. (in Russian)

Report on the activities of the Kizhi State Historical-Architectural and Ethnographic Museum-Reserve. 2023. In: Bazegskaya E.B. (ed.). Petrozavodsk: Publishing Center of the Museum-Reserve "Kizhi". (in Russian)

Reynolds C.S. 2008. A Changing paradigm of pelagic food webs. *International Review of Hydrobiology* 93 (4–5): 517–531.

Ribeiro M.S.F., Moutinho F.H.M., Hanisch W.S. et al. 2017. Monitoring of cyanobacterial populations and the detection of cyanotoxin-genes in Billings Reservoir (Diadema/São Paulo, Brazil). *Marine and fresh-water harmful algae* 1: 108–111.

Sabylina A.V., Efremova T.A., Ryzhakov A.V. et al. 2012. Biogenic elements and organic matter in Lake Onego and its bays. Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and marine waters. In: Proceedings of the V All-Russian Symposium with international participation. Petrozavodsk, 10-14 September 2012. Petrozavodsk, pp. 75-78. (in Russian)

Sabylina A.V., Ryzhakov A.V. 2007. Chemical composition of the lake water. Lake Onego and its tributaries. In: Lozovik P.A., Kulikova T.P., Martynova N.N. (ed.), *State of water bodies of the Republic of Karelia according to the results of monitoring in 1998-2006*. Petrozavodsk, pp. 29–40. (in Russian)

Sabylina A.V. 1999. Current hydrochemical regime of the lake. In: Filatov N.N. (ed.), *Onego Lake. Ecological problems*. Petrozavodsk, pp. 58–99. (in Russian)

Semenchenko V.P. 2014. Effects of higher aquatic vegetation on the plankton community in the littoral zone of lakes. In: Proceedings of the international scientific conference dedicated to the 40th anniversary of the Department of General Ecology and Methods of Teaching Biology. Minsk, October 23–25, 2014. Minsk, pp. 49–51. (in Russian)

Shannon C.E., Weaver W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press.

Sladeczek V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *ArchivfürHydrobiologie. BeiheftErgebnisse*

der *Limnologie* 7: 1–128.

Somdee T., Kaewsan T., Somdee A. 2013. Monitoring toxic cyanobacteria and cyanotoxins (microcystins and cylindrospermopsins) in four recreational reservoirs (KhonKaen, Thailand). *Environmental monitoring and assessment* 185: 9521–9529.

Syarki M.T., Tekanova E.V., Chekryzheva T.A. 2015. Plankton of the Onego Lake pelagial. Certificate of state registration of the database No. 2015620274. Right holder: Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IWPS Karelian Scientific Center RAS) (RU). Date of registration in the database registry is February 13, 2015. (in Russian)

Tekanova E.V., Kalinkina N.M., Makarova E.M. et al. 2023. Current trophic state and water quality of Lake Onego. *Biologiya vnutrennix vod* [Biology of Inland Waters] 6: 740–746. (in Russian)

Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas*. Suomen-LuonnonsuojelunTuki Oy. Helsinki: Forssa.

Vasser S.P., Kondratieva N.V., Masyuk N.P. et al. 1989. *Algae. Handbook*. Kiev: Naukova Dumka. (in Russian)

Vislyanskaya I.G., Kulikova T.P., Polyakova T.N. et al.

1999. *Sovremennoe sostoyanie gidrobiocenozov rajona Kizhskix shxer Onezhskogo ozera*. Trudy` Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya B. «Biogeografiya Karelii» [Current state of hydrobiocenoses of the Kizhi skerries area of Lake Onego. Proceedings of the Karelian Scientific Center of the RAS. Series B. "Biogeography of Karelia"] 1: 113–120. (in Russian)

Winder M., Sommer U. 2012. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia* 698: 5–16.

Zabelina M.M., Kiselev I.A., Proshkina-Lavrenko A.I. et al. 1951. *Diatom algae. Definitel of freshwater algae of the USSR*. Issue 4. Moscow: Sovetskaya nauka. (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. Available online. Accepted 15 March 2022. DOI: [10.1016/j.dib.2022.108079](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079)

Zobkov M.B., Efremova T.A. 2023. Microplastic content in bottom sediments of lakes of specially protected natural territories on the example of Kizhi skerries of Lake Onego and Lake Vodlozero. *Vodnye resursy* [Water resources] 50(3): 1–12. (in Russian)

Трофическое состояние района Кижских шхер Онежского озера и оценка качества воды по показателям летнего фитопланктона

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Смирнова В.С.

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

АННОТАЦИЯ. В результате исследования летнего фитопланктона (в июле-августе 2020 г. и 2022 г.) в районе Кижских шхер Онежского озера, были выявлены высокие количественные показатели развития фитопланктона, характеризующий этот район как мезо-эвтрофный. Фитоценоз отличался высоким видовым разнообразием, что характерно для сообщества летнего фитопланктона Онежского озера. Однако, на момент исследования наибольшее количественное развитие получили виды-индикаторы β -мезосапробной зон загрязнения (3 класс качества воды, удовлетворительно-чистая). Были отмечены виды потенциально способные к выработке цианотоксинов, но их количественное развитие было минимальным. Анализ многолетних изменений показал увеличение численности цианобактерий, зеленых и эвгленовых водорослей. Общая биомасса фитопланктона увеличилась за счет многочисленных, мелкоклеточных цианобактерий и крупноклеточных, но не многочисленных бентосных и планктонно-бентосных видов диатомовых водорослей. Интенсивное развитие фитопланктона в районе исследования связано с природными условиями этого района. Определение более точных причин увеличения количественных показателей фитопланктона в последние годы требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: фитопланктон, о. Кижы, Онежское озеро, численность, биомасса

Для цитирования: Смирнова В.С. Трофическое состояние района Кижских шхер Онежского озера и оценка качества воды по показателям летнего фитопланктона // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - С. 30-51. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-30

1. Введение

Кижский архипелаг – система островов, расположенных в северо-западной части Онежского озера, второго по величине пресноводного водоема в Европе. От всех других районов озера Кижские шхеры отличаются уникальным геологическим строением (Голубев, 1999; Дейнес, 2013). На данной территории благодаря ландшафтным особенностям сформировались особые условия для развития не только наземных биоценозов, но и водных (Капитонова, 2008; Дейнес, 2013). Развитие гидробиоценозов в данном районе происходят в условиях хорошо прогреваемого мелководья, слабой динамики водных масс, поэтому еще в более ранний период исследований (60-70-е гг.) этот район выделялся как наиболее продуктивный (Вислянская и др., 1999; Чекрыжева, 2008).

На одном из островов Кижского архипелага (о. Кижы) располагается Архитектурный ансамбль

Кижского погоста. Государственный историко-архитектурный и этнографический музей-заповедник «Кижы» объединил на острове Кижы 68 памятников архитектуры (Онежское озеро. Атлас, 2010). Архитектурный ансамбль Кижского погоста был включен в Список объектов всемирного культурного наследия ЮНЕСКО в 1990 г. и стал одним из трех первых российских объектов в списке ЮНЕСКО. С 1989-1997 гг. заповедник ежегодно посещали от 65 тыс. до 158 тыс. человек (Протасов, 1999). Именно в это время район Кижских шхер начинает подвергаться значительной антропогенной нагрузке за счет воздействия водного транспорта, а также увеличения количества хозяйственно-бытовых сточных вод от музея-заповедника и частных домов. В течение летнего сезона (июль-август) с 1992 по 2011 гг. отмечались высокие концентрации нефтепродуктов в воде от 0.15 до 0.6 мг/л (Сабылина, 1999; Протасов, 1999; Сабылина и Рыжаков, 2007; Сабылина и др., 2012). По концентрации общего фосфора в воде в

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: smirnovalera24@yandex.ru (В.С. Смирнова)

Поступила: 10 июля 2024; Принята: 13 января 2025;

Опубликована online: 26 февраля 2025

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



этот период район Кижских шхер характеризовался как мезотрофный (до 25 мкг/л) (Galakhina et al., 2022). Именно в это время отмечаются изменения в фито- и бактериопланктоне изучаемого района. По уровню развития данных представителей биоценоза район Кижских шхер также был отнесен к мезотрофным участкам Онежского озера (Вислянская и др., 1999; Чекрыжева, 2008).

В настоящее время количество приезжающих туристов увеличилось до 360 тыс. в год (Отчет о деятельности..., 2023). Обнаружено максимальное содержание микропластика в донных осадках рядом с главным пассажирским причалом музея-заповедника «Кижь» (Зобков и Ефремова, 2023). Однако, в результате последних гидрохимических исследований (2019-2020 гг.) отмечаются уменьшение общего фосфора, нитратов, БПК₅ по сравнению с многолетними данными в этом районе (Galakhina et al., 2022).

Фитопланктон быстро реагирует на изменение условий обитания, что позволяет определить трофический статус и санитарное состояние водных объектов (Абакумов, 1977; Reynolds, 2008; Parmar et al., 2016). Таким образом, целью данного исследования является оценка современного состояния (качество воды и трофический статус) прилегающей территории к музею-заповеднику «Кижь» с использованием количественных и структурных показателей летнего фитопланктона.

2. Материалы и методы исследования

В июле-августе в 2020 г. и 2022 г. на двух станциях в районе Кижских шхер Онежского озера были отобраны четыре пробы воды для анализа фитопланктона в поверхностном слое (0.5 м). Станция Z_2 (глубина 5 м), расположена возле причала водного транспорта на о. Кижь, где располагается музей-заповедник «Кижь», станция Z_3 (глубина 10 м), находится с восточной стороны острова (Рис. 1).

Пробы воды объемом 500 мл, отобранные батометром Руттнера, фиксировали 10 мл 40%-ого формалина, затем концентрировали на мембран-

ных фильтрах (диаметр пор 0.8 мкм) до объема 5 мл (Кузьмин, 1975; Федоров, 1979). Видовую идентификацию проводили по определителям (Забелина и др., 1951; Матвиенко, 1954; Tikkanen, 1986; *Freshwater Algae of ...*, 2015) с помощью микроскопа Микмед-6 при увеличении x400. Видовое разнообразие сообщества фитопланктона оценивали по индексу Шеннона-Уивера (H) (Shannon and Weaver, 1949), равномерность распределения видов в сообществе по индексу выравненности Пиелу (E) (Одум, 1986). К категории доминирующих видов относили виды с численностью и/или биомассой более 10%, к видам-субдоминантам – более 5%. Эколого-географическую характеристику и индикаторную значимость видов фитопланктона определяли по методике (Макрушин, 1974; Вассер и др., 1989; Барина и др., 2006). Индекс сапробности воды рассчитывали по методу Пантле-Бука в модификации Сладечека (Sladecsek, 1973), зона сапробности воды определяли по (Оксиюк и др., 1993). Для анализа современных данных фитопланктона с многолетними использовали зарегистрированную базу данных (Сярки и др., 2015) и коэффициент ранговой корреляции Спирмена, выполненный в пакете Statistica Advanced 10 for Windows Ru. Температуру поверхности воды в период исследования измеряли прибором CastAway-CTD и сравнивали с зарегистрированными данными температуры, используя доверительный интервал (Калинкина и др., 2023).

3. Результаты и обсуждение

В составе фитопланктона в районе Кижских шхер на момент исследования было выявлено 105 таксонов, в том числе, 97 таксонов водорослей рангом ниже рода, 8 таксонов рангом до рода, принадлежащих к 7 систематическим отделам: Bacillariophyta – 38 (36.2%), Chlorophyta – 29 (27.6%), Cyanobacteria – 16 (15.2%); Chrysophyta – 15 (14.3%); Euglenophyta – 3 (2.9%); Cryptophyta – 1 (1%), Dinophyta – 3 (2.8%) (Таблица 1). Видовой состав фитопланктона характерен для фитоценоза Онежского озера (Чекрыжева, 2012).

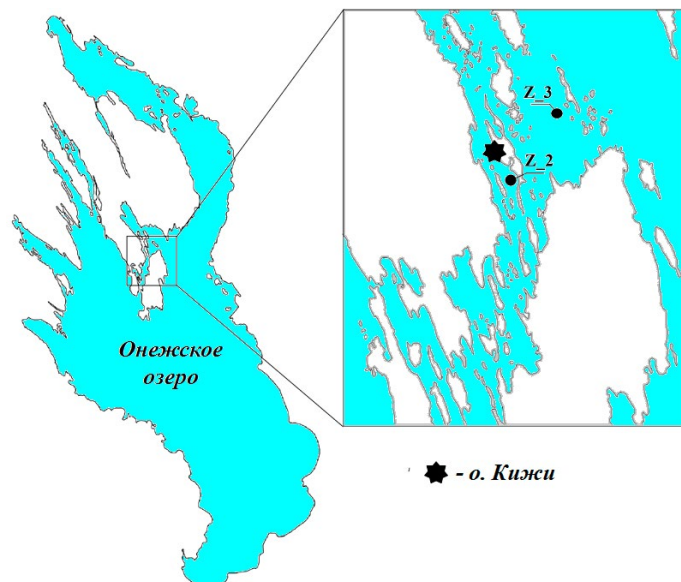


Рис.1. Карта-схема расположения станций отбора проб фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера.

Таблица 1. Встречаемость видов летнего фитопланктона на станциях отбора проб воды в районе Кижских шхер Онежского озера

№	Видовой состав	Станции	
		Z_2	Z_3
Cyanobacteria			
1	<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv.	+	+
2	<i>Merismopedia punctata</i> Meyen.	+	-
3	<i>Aphanocapsa elachista</i> var. <i>elachista</i> W. et G. S. West	+	+
4	<i>Aphanothece clathrata</i> W. et G.S. West f. <i>clathrata</i>	+	+
5	<i>Gloeocapsa limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. (= <i>Croococcus limneticus</i> Lemm.)	+	+
6	<i>Gloeocapsa magma</i> (Bréb.) Kütz. emend Hollerb.	-	+
7	<i>Gloeocapsa minima</i> (Keissl.) Hollerb. ampl. f. <i>minima</i>	+	-
8	<i>Gloeocapsa minor</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Croococcus minor</i> (Kütz.) Näg.)	+	-
9	<i>Gloeocapsa minor</i> f. <i>dispersa</i> (Keissler) Hollerbach	+	+
10	<i>Gloeocapsa punctata</i> Näg. emend. Hollerb.	+	+
11	<i>Gloeocapsa turgida</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Chroococcus turgidus</i> (Kütz.) Näg.)	+	-
12	<i>Gloeocapsa vacuolata</i> (Skuja) Hollerb.	+	+
13	<i>Gloeocapsa varia</i> (A. Br.) Hollerb.	-	+
14	<i>Gomphosphaeria lacustris</i> Chod. (= <i>Snowella lacustris</i> (Chod.) Kom. et Hind.)	+	+
15	<i>Oscillatoria planctonica</i> Wolosz. (= <i>Limnothrix planctonica</i> (Wolosz.) Meffert	+	-
16	<i>Gloeocapsa</i> sp.	-	+
Cryptophyta			
17	<i>Cryptomonas erosa</i> Ehr.	+	-
Dinophyta			
18	<i>Glenodinium edax</i> Schilling.	+	-
19	<i>Peridinium cinctum</i> (Müll.) Ehrb.	+	-
20	<i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müll.) Schrank	+	+
Chrysophyta			
21	<i>Chrysococcus cordiformis</i> Naum.	+	-
22	<i>Chrysococcus rufescens</i> Klebs. var. <i>rufescens</i>	+	-
23	<i>Kephyrion ovum</i> Pascher	+	-
24	<i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof var. <i>bavaricum</i>	+	+
25	<i>Dinobryon divergens</i> Imhof.	+	+
26	<i>Dinobryon sertularia</i> Ehr.	+	+
27	<i>Dinobryon sociale</i> Ehr.	+	-
28	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i> (Stein) Lemm.	+	+
29	<i>Dinobryon suecicum</i> Lemm.	+	+
30	<i>Pseudokephyrion entzii</i> Corn.	+	+
31	<i>Mallomonas caudate</i> Iwan. Ssensu Krieger	+	-
32	<i>Mallomonas coronata</i> Boloch.	-	+
33	<i>Mallomonas fressenii</i> Kent.	+	-
34	<i>Bitrichia chodatii</i> (Reverdin) Chodat.	-	+
35	<i>Chrysopyxis urna</i> Korsch.	-	+
Bacillariophyta			
36	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.	-	+
37	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz. (= <i>C. kuetzingiana</i>)	+	+
38	<i>Cyclotella schumannii</i> (Grun.) Håkasson (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>schumannii</i> Grun.)	+	-
39	<i>Discostella stelligera</i> (Cleve et Grunow) Houk et Klee	+	+

№	Видовой состав	Станции	
		Z_2	Z_3
40	<i>Puncticulata bodanica</i> (Grun.) Håkansson	+	+
41	<i>Puncticulata comta</i> (Ehr.) Håkansson.	+	+
42	<i>Puncticulata radiosa</i> (Lemm.) Håkansson	+	+
43	<i>Melosira varians</i> Ag.	+	-
44	<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Sim. (= incl. <i>f. curvata f. islandica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica ssp. helvetica</i> O. Müll. (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica ssp. helvetica</i> O. Müll.	+	+
45	<i>Aulacoseira granulate</i> (Ehr.) Sim.	+	+
46	<i>Aulacoseira italica</i> (Ehr.) Kütz. <i>f. italica</i>	+	+
47	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Sim.	-	+
48	<i>Fragilaria constricta</i> Ehr. <i>f. constricta</i>	+	-
49	<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt.	+	+
50	<i>Fragilaria pinnata</i> Ehr.	+	-
51	<i>Synedra acus</i> Kütz. <i>ssp. acus</i>	-	+
52	<i>Asterionella formosa</i> Hass. <i>var. formosa</i>	+	+
53	<i>Diatoma tenuis</i> Ag. (= <i>D. elongatum</i> (Lyngb.) Ag.)	+	-
54	<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz.	+	+
55	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz. (incl. <i>var. ventricosa</i> Grun.)	+	-
56	<i>Navicula dicephala</i> (Ehr.) W. Sm.	+	-
57	<i>Navicula longirostris</i> Hust.	+	-
58	<i>Navicula rotaeana</i> (Rabench.) Grun.	+	-
59	<i>Navicula salinarum f. capitata</i> Schulz	+	+
60	<i>Diploneis smithii</i> (Bréb.) Cl. <i>var. smithii</i>	+	-
61	<i>Frustulia rhomboides var. saxonica</i> (Rabenh.) D. T.	-	+
62	<i>Cymbella lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. <i>var. lanceolata</i> (incl. <i>var. notata</i> Wisl. et Poretzky)	+	-
63	<i>Cymbella ventricosa</i> Kütz. <i>var. ventricosa</i>	+	-
64	<i>Amphora coffeaformis</i> (Ag.) Kütz. <i>var. coffeaformis</i>	+	-
65	<i>Amphora ovalis</i> (Kütz.) Kütz. (incl. <i>var. gracilis</i> (Ehr.) Cl.)	+	-
66	<i>Amphora pediculus</i> (Kütz.) Grun. (= <i>A. ovalis var. pediculus</i> (Kütz.) V.H.)	+	-
67	<i>Nitzschia acicularis</i> (Kütz.) W. Sm.	+	-
68	<i>Nitzschia angustata</i> (W. Sm.) Grun. <i>var. angustata</i>	+	-
69	<i>Nitzschia dissipata</i> (Kütz.) Grun.	+	-
70	<i>Nitzschia hungarica</i> Grun.	+	-
71	<i>Nitzschia tryblionella var. levidensis</i> (W. Sm.) Grun.	+	+
72	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. (incl. <i>var. costatum</i> (W. Sm.) Grun.)	-	+
73	<i>Cyclotella</i> sp.	-	+
Euglenophyta			
74	<i>Trachelomonas volvocina</i> Ehr. <i>var. volvocina</i>	+	+
75	<i>Trachelomonas volvocina var. subglobosa</i> Lemm. <i>sens. Swir.</i>	+	-
76	<i>Trachelomonas</i> sp.	+	-
Chlorophyta			
77	<i>Chlamydomonas globosa</i> Snow.	+	+
78	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> P.A. Dang.	+	+
79	<i>Lobomonas stellate</i> Chod.	+	+
80	<i>Eudorina elegans</i> Ehr.	+	-
81	<i>Pediastrum duplex</i> Meyen.	+	-

№	Видовой состав	Станции	
		Z_2	Z_3
82	<i>Coenococcus planctonicus</i> Korschik.	+	+
83	<i>Chlorella vulgaris</i> Beyer. var. <i>vulgaris</i>	-	+
84	<i>Oocystis elliptica</i> W. Sm.	-	+
85	<i>Oocystis lacustris</i> Chod.	+	+
86	<i>Oocystis submarina</i> Lagerh.	+	-
87	<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komark-Legn.	+	+
88	<i>Coelastrum cambricum</i> Arch.	+	-
89	<i>Coelastrum sphaericum</i> Näg.	-	+
90	<i>Crucigenia quadrata</i> Morren.	+	+
91	<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirchn.) W. et G. West.	+	+
92	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Bréb.	+	-
93	<i>Kirchneriella contorta</i> (Shmidle) Bohl.	+	+
94	<i>Koliella spiculiformis</i> (Vischer) Hind.	+	+
95	<i>Ulothrix zonata</i> (Web. et. Mohr.) Kütz. var. <i>zonata</i>	+	-
96	<i>Gloeotila spiralis</i> Chod.	+	+
97	<i>Closterium gracile</i> Bréb. var. <i>gracile</i>	+	-
98	<i>Closterium pusillum</i> Hantzsch.	+	+
99	<i>Staurastrum paradoxum</i> Meyen.	+	+
100	<i>Ankyra juday</i> (G. M. Smith.) Fott.	-	+
101	<i>Chlamydomonas</i> sp.	-	+
102	<i>Coenococcus</i> sp.	+	-
103	<i>Monodus</i> sp.	+	+
104	<i>Stigeoclonium</i> sp.	-	+
105	<i>Ulothrix</i> sp.	+	-

В фитопланктоне района Кижских шхер преобладали космополитные (84.5%) и бореальные (8.2%) виды (Таблица 2). В сообществе в основном встречались планктонные (58.8%), планктонно-бентосные (15.6%) и бентосные формы (15.6%) (см. Таблицу 2). Виды сообщества по отношению к солености были представлены индифферентными видами (59.8%), олигогалолами (12.4%), олигогалоб-галофилами (12.4%) и олигогалоб-галофобами (7.2%) (см. Таблицу 2), что характерно для такого маломинерализованного водоема как Онежское озеро (Озера Карелии, 2013). По отношению к кислотности водной среды наибольшую долю составляли индифферентные виды (50.5%), алкалофильные, предпочитающие слабощелочные воды (28.9%) и наименьшую – ацидофильные, способные обитать в условиях высокой кислотности (10.3%) (см. Таблицу 2).

В настоящее время (2020 г. и 2022 г.) в доминантный комплекс по биомассе (В) входили крупные виды Bacillariophyta ($V_{кл.} < 72250$ мкм³), Dinophyta ($V_{кл.} < 19000$ мкм³) и Chrysophyta ($V_{кл.} < 1376$ мкм³) (Таблица 3). Виды-субдоминанты были представлены Chrysophyta и Bacillariophyta (см. Таблицу 3).

Доминантами по численности (N) в основном выступали мелкоклеточные виды цианобактерий ($V_{кл.} < 9$ мкм³) и крупнее – золотистые водоросли ($V_{кл.} < 1376$ мкм³) (см. Таблицу 2). Виды-

субдоминанты были представлены Cyanobacteria, Chrysophyta и Chlorophyta (см. Таблицу 2).

Сообщество фитопланктона в период исследований характеризовалось высоким видовым разнообразием, индекс Н варьировал от 3.24 до 3.97 по численности, по биомассе достигал 2.63–4.03. Индекс выравненности Е изменялся от 1.97 до 2.19 по численности, от 1.63 до 2.23 – по биомассе и указывал на равномерное распределение видов в фитоценозе.

Один из важных индексов, используемых для оценки степени загрязнения водоемов органическими веществами, является индекс сапробности (Барина и др., 2006). В период исследования в альгоценозе присутствовали в основном виды-индикаторы олигосапробной (31.6%), α - β -мезосапробной (33.7%) и β -мезосапробной (28.9%) зон загрязнения. Были обнаружены виды-индикаторы сильно загрязненных органическим веществом вод – *Chlorella vulgaris* var. *vulgaris* на ст. Z_2 и Z_3 и *Stephanodiscus hantzschii* на ст. Z_3 (ρ - α -сапробионты) (Таблица 4). Наибольшее количественное развитие на обеих станциях исследования получили олигосапробы, α - β -мезосапробы и β -мезосапробы (см. Таблицу 4).

В результате анализа сапробиологических характеристик видов фитопланктона, обнаруженных в районе Кижских шхер Онежского озера на

Таблица 2. Эколого-географическая характеристика летнего фитопланктона в районе Кижских шхер северо-западной части Онежского озера в июле-августе в 2020 г. и 2022 г.

Показатели	Число видов	% от общего числа видов
Распространение		
Космополиты	82	84.5
Бореальные	8	8.2
Альпийские	1	1.1
Нет данных	6	6.2
Местообитание		
Планктонные	57	58.8
Бентосные	15	15.6
Планктонно-бентосные	15	15.6
Литоральные	1	4
Обитатели обрастаний	4	1
Эпибионты	1	1
Нет данных	4	4
Галобность		
Индифференты	58	59.8
Олигогалобы	12	12.4
Олигогалоб-галофилы	12	12.4
Олигогалоб-галофобы	7	7.2
Мезогалобы	3	3.1
Нет данных	5	5.1
Отношение к pH		
Индифференты	49	50.5
Алкалифилы	28	28.9
Ацидофилы	10	10.3
Нет данных	10	10.3

момент исследования, и расчета индекса сапробности (1.61 ± 0.09) (см. Таблицу 4), данный тип вод можно отнести к β -мезосапробному (3 класс качества воды, удовлетворительно-чистая).

Среди цианобактерий в районе исследования были отмечены виды, потенциально способные к выделению цианотоксинов, опасных для здоровья и жизни человека и животных – *Oscillatoria planctonica* (= *Limnothrix planctonica*) (Somdee et al., 2013; Oliveira et al., 2019), *Aphanocapsa elachista* var. *elachista* (Krienitz et al., 2013), *Merismopedia punctata* (Ribeiro et al., 2017), *Synechocystis aquatilis* (Magalhaes et al., 2003), *Gomphosphaeria lacustris* (= *Snowella lacustris*) (Echenique et al., 2014). На изученных станциях их количество составляло в среднем 990 кл./мл. На ст. Z_2 средняя численность потенциально опасных видов составляла 584 кл./мл., наибольшее количество было отмечено с восточной стороны острова – на ст. Z_3 (1640 кл./мл) (см. Рис. 1). Согласно пороговому значению опасного содержания цианобактерий (20000 кл./мл), способных к выделению цианотоксинов, введенного Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) (Guidelines for..., 2003), обнаруженное на изученной акватории количество потенциально опасных цианобак-

терий не угрожало здоровью и жизни человека и животных.

В летний период в 2020 г. и 2022 г. в районе исследования наблюдались высокие количественные показатели развития микроводорослей. Общая численность в среднем (N_{tot}) составляла 7134.4 ± 1097.14 тыс.кл./л, а общая биомасса (B_{tot}) фитопланктона – 3.685 ± 1.25 мг/л. Трофический статус по показателям летнего фитопланктона в период исследования характеризовался как мезо-эвтрофный (Китаев, 2007) (Таблица 5). Наибольшие показатели биомассы и численности были отмечены на ст. Z_3 (см. Рис. 1), особенно в 2022 г. (см. Таблицу 5).

На момент исследования в фитоценозе по численности преобладали цианобактерии (43.3–76.6%) и золотистые водоросли (8–40.3%). В наименьшем количестве присутствовали Bacillariophyta (5–12%), Chlorophyta (5.8–14.4%) и Dinophyta, Cryptophyta, Euglenophyta (по численности занимали не более 2%) (Рис. 2а).

Наибольший вклад в биомассу составляли золотистые (37.4–60%), диатомовые (24–43.8%) и динофитовые водоросли (1.1–16.5%) (Рис. 2б). Остальные отделы микроводорослей по биомассе

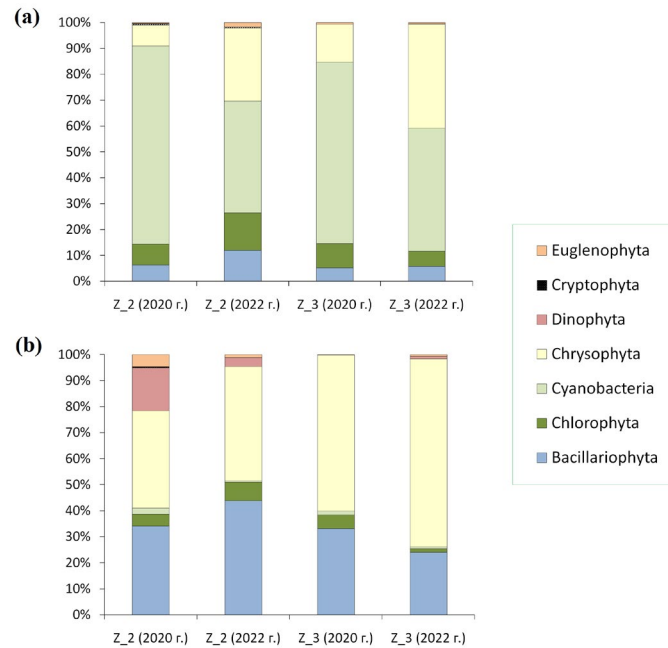


Рис.2. Соотношение различных групп фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера в летний период (2020 г. и 2022 г.): (а) – по численности, (б) – по биомассе.

были представлены в наименьшем количестве (Chlorophyta 1.4–7.2%; Cryptophyta, Euglenophyta, Cyanobacteria – не более 5%) (см. Рис. 2б).

В результате анализа сравнения показателей фитопланктона в районе Кижских шхер более ранних исследований (1996-2010 гг.) с современными (2020 г. и 2022 г.) было выявлено увеличение N_{tot} и V_{tot} за счет некоторых групп фитопланктона (Таблица 6). Ранее в летний период по численности в районе исследования интенсивно вегетировали мелкоклеточные виды рода *Chlorococcales* и золотистых водорослей (Чекрыжева, 2008). Однако на момент исследования было отмечено статистически значимое увеличение численности цианобактерий, зеленых и эвгленовых водорослей. Ранговый коэффициент корреляции Спирмена между количеством цианобактерий (N_{cyan}) и годом исследований

(1996–2022 гг.) составил 0.65 ($p < 0.05$, $n = 10$), между количеством зеленых (N_{chl}) и эвгленовых (N_{eug}) водорослей и годом исследований – 0.82 ($p < 0.05$, $n = 10$) и 0.67 ($p < 0.05$, $n = 10$), соответственно (см. Таблицу 6), что привело к увеличению N_{tot} микроводорослей ($p = 0.71$, $n = 10$).

Увеличение количества отмеченных выше групп водорослей, являющимися хорошими индикаторами органического загрязнения (Водоросли, вызывающие ..., 2006), могли бы рассматриваться как показатель действующей антропогенной нагрузки на акватории Кижского архипелага. Однако, содержание общего фосфора в районе исследования (7-13 мкг/л) не отличается от присутствия этого элемента в центральном плесе озера (Zobkov et al., 2022). Важно заметить, что в районе Кижских шхер произрастает большое количество

Таблица 3. Доминантные и субдоминантные виды летнего фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера в период исследования

Показатель	Доминантные виды	Виды-субдоминанты
N (тыс.кл./л)	<i>Aphanocapsa elachista</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Gomposphaeria lacustris</i> Chod. ^{Cyan} <i>Aphanothece clathrata</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Dinobryon sociale</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon suecicum</i> Lemm. ^{Chry}	<i>Aphanothece clathrata</i> W. et G. S. West ^{Cyan} <i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry} <i>Pediastrum duplex</i> Meyen. ^{Chl}
B (мг/л)	<i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry} <i>Dinobryon sociale</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon suecicum</i> Lemm. ^{Chry} <i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz. ^{Bac} <i>Melosira varians</i> Ag. ^{Bac} <i>Cymbella lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. ^{Bac} <i>Ceratium hirundinella</i> (O. F. Müll.) Schrank ^{Din}	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Sim. ^{Bac} <i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt. ^{Bac} <i>Dinobryon sertularia</i> Ehr. ^{Chry} <i>Dinobryon divergens</i> Imhof. ^{Chry}

Примечание: Надстрочные обозначения принадлежности к отделу: ^{Bac} – Bacillariophyta; ^{Chl} – Chlorophyta; ^{Cyan} – Cyanobacteria; ^{Chry} – Chrysophyta; ^{Din} – Dinophyta.

Таблица 4. Количество индикаторных видов ($N_{инд.}$) сапробности воды и их доля в численности фитопланктона (%) в районе Кижских шхер в июле-августе 2020 г. и 2022 г.

Сапробность	Ст. Z_2				Ст. Z_3			
	2020		2022		2020		2022	
	$N_{инд.}$	%	$N_{инд.}$	%	$N_{инд.}$	%	$N_{инд.}$	%
х-сапробы	–	–	–	–	–	–	–	–
х-о-сапробы	1	0.2	1	0.1	–	–	–	–
о-сапробы	10	10.1	11	19.8	5	3.0	9	35.7
о-β-мезосапробы	13	22.1	14	35.8	8	27.8	9	27.8
о-α-мезосапробы	2	0.5	1	1.1	–	–	1	0.4
β-мезосапробы	17	64.1	18	32.6	12	58.8	11	32.4
β-α-мезосапробы	1	0.2	1	0.1	–	–	1	0.1
α-мезосапробы	1	0.4	5	0.8	1	0.4	1	0.1
р-α-сапробы	1	0.4	–	–	2	0.4	–	–
р-сапробы	–	–	–	–	–	–	–	–
Индекс сапробности	1.82		1.45		1.72		1.45	

Примечание: «–» виды-индикаторы, отсутствующие в фитоценозе в данный момент.

высшей водной растительности, которые могут выступать в качестве конкурента с фитопланктоном за биогенные элементы или ингибировать развитие водорослей за счет аллелопатических веществ (Семенченко, 2014).

На статистически значимое увеличение V_{tot} фитопланктона ($p=0.76$, $n=10$) повлияли только не крупные ($V_{кл.} < 9 \text{ мкм}^3$), но многочисленные цианобактерии (B_{cyan}) ($p=0.68$, $n=10$), а также крупные, но с небольшой численностью – диатомеи (B_{bac}) ($p=0.76$, $n=10$) (см. Таблицу 5). В диатомовом комплексе были встречены крупноклеточные бентосные (*Nitzschia hungarica*, *Cymbella lanceolata* var. *lanceolata*, *Frustulia rhomboids* var. *saxonica*, *Diploneis smithii* var. *smithii*) и планктонно-бентосные виды (*Melosira varians*, *Acanthoceras zachariasii*) объем клеток которых варьировал от 4160 до 72250 мкм^3 . На увеличение общей биомассы увеличение численности эвгленовых и зеленых водорослей не отразилось, так как в период исследования были отмечены менее крупные виды. Среди эвгленовых водорослей в период исследования (2020 г. и 2022 г.) доминировали – *Trachelomonas volvocina* var. *volvocina* и *Trachelomonas volvocina* var. *subglobosa*, объемы клеток которых не превышали 1609 мкм^3 , среди зеленых водорослей – различные виды порядка хлорококковые (Chlorococcales), размеры которых варьировали в основном от 143–496 мкм^3 .

В целом, экосистема Онежского озера за период с 1992-2022 гг. не претерпела изменений.

По показателям хлорофилла *a* и сапрофитным бактериям трофический статус центрального глубоководного плеса Онежского озера остается на уровне олиготрофии с отличным качеством воды (Теканова и др., 2023). Уровень трофии в литоральной зоне в разных районах Онежского озера также остается олиготрофным по показателям летнего фитопланктона (Чекрыжева, 2008; Чекрыжева и Калинкина, 2016). Исключением, являются два района с более повышенным уровнем трофии – Кондопожская губа, где источником загрязнения являются ЦБК в прибрежье в вершинной части залива и форелевые фермы в ее центральной части, а также район Кижских шхер.

Несмотря на увеличение мелкоклеточных более продуктивных форм водорослей (Гутельмахер, 1986) анализ сравнения концентраций хлорофилла *a* (Хл *a*) в районе Кижских шхер Онежского озера предыдущих исследований (Хл *a* = 3.4 ± 0.3 – 1992-2010 гг.) с более современными (Хл *a* = 4.6 ± 0.7 – 2016-2022 гг.) показал отсутствие значимых различий (Теканова и др., 2023). Температура поверхностного слоя в 2020 г. ($17.4-18.0^\circ\text{C}$) находилась в пределах многолетней изменчивости этого показателя для августа изучаемого района (Онежское озеро. Атлас, 2010; Калинкина и др., 2023). Однако, температура поверхности в 2022 г. достигала $21-22^\circ\text{C}$ и выходила за пределы доверительного интервала ($p < 0.05$, $n = 12$) в сравнении с более ранними наблюдениями этого показателя

Таблица 5. Количественные показатели развития фитопланктона в летний период в районе Кижских шхер (2020 г. и 2022 г.)

Станция	Время отбора	N_{tot} (тыс. кл./л)	V_{tot} (мг/л)	Трофическое состояние
Z_2	2020 г.	6900	1.662	α-мезотрофный
Z_3		7012.5	2.183	β-мезотрофный
Z_2	2022 г.	4637.5	3.684	β-мезотрофный
Z_3		9987.5	7.210	α-евтрофный

Таблица 6. Статистические характеристики фитопланктона района Кижских шхер в ранний (1996 – 2010) и в современный периоды исследования (2020 г. и 2022 г.).

Показатели фитопланктона	Ранние наблюдения		Современные наблюдения	
	$M \pm m$	$\frac{Min}{max}$	$M \pm m$	$\frac{Min}{Max}$
N_{tot} (тыс.кл./л)	1016.1 ± 437.98	$\frac{5}{2930}$	7134.4 ± 1097.14	$\frac{4637.5}{9987.5}$
N_{cyan} (тыс.кл./л)	456.4 ± 417.80	$\frac{2.5}{2125}$	4239.1 ± 752.73	$\frac{2006.3}{5287.5}$
N_{chl} (тыс.кл./л)	95.3 ± 25.58	$\frac{29}{167.5}$	617.2 ± 28.11	$\frac{562.5}{668.8}$
N_{eug} (тыс.кл./л)	8.8 ± 1.25	$\frac{7.5}{10}$	51.6 ± 11.52	$\frac{25}{81.3}$
B_{tot} (мг/л)	0.729 ± 0.24	$\frac{0.013}{1.618}$	3.685 ± 1.25	$\frac{1.662}{7.210}$
B_{cyan} (мг/л)	0.016 ± 0.01	$\frac{0.0002}{0.03}$	0.033 ± 0.01	$\frac{0.013}{0.048}$
B_{bac} (мг/л)	0.512 ± 0.22	$\frac{0.011}{1.548}$	1.157 ± 0.3	$\frac{0.564}{1.730}$

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение и ее ошибка; min/max – минимальные и максимальные значения.

(1996-2017 гг.) (Калинкина и др., 2023). Возможно, более значительный прогрев поверхностного слоя воды мог привести к более интенсивному росту фитопланктона в 2022 г. (Winder and Sommer, 2012). Выявление точных причин увеличения количественных показателей фитопланктона в период исследования требует дополнительных исследований.

Таким образом, сформировавшиеся особые природные условия в районе Кижских шхер Онежского озера, в отличие от других участков озера, определяют более продуктивное развития фитопланктона в летний период. Однако, при усилении антропогенной нагрузки и потепления климата возможны более сильные изменения в фитоценозе исследованного района.

4. Выводы

В результате исследования летнего фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера в июле-августе 2020 г. и 2022 г. отмечено интенсивное развитие летнего фитопланктона. Видовой состав был характерен для фитоценоза Онежского озера, однако наибольшее количественное развитие получили виды-индикаторы β -мезосапробной зон загрязнения (3 класс качества воды, удовлетворительно-чистая). Кроме того, были отмечены потенциально опасные виды, способные к выработке цианотоксинов. Однако их количественное развитие было минимальным: от 584 кл./л до 1640 кл./л. При сравнении с более ранними исследованиями (1996-2010 гг.) обнаружено увеличение количественных показателей развития фитопланктона в последние годы (N_{max} до 9987.5 тыс.кл./л; B_{max} до 7.210 мг/л). Обнаружено увеличение цианобактерий, зеленых и эвгленовых водорослей, одних из главных индикаторов процесса эвтрофирования водоемов. Общая биомасса увеличилась за счет многочисленных, мелкоклеточных цианобактерий и крупноклеточ-

ных, но не многочисленных бентосных и планктонно-бентосных видов диатомовых водорослей. Состояние исследованного участка характеризовалось, как мезо-эвтрофное.

Несмотря на увеличение потока туристов, следовательно, увеличение количества водного транспорта и возможного увеличения сточных бытовых вод, состояние локального участка Кижских шхер Онежского озера по биогенным элементам остается на уровне олиготрофии. Увеличение количественных показателей фитопланктона в 2022 г. возможно, связано с лучшим прогревом поверхностного слоя воды. Выявление более точных причин увеличения микроводорослей в последние годы требует дополнительных исследований.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Echenique R.O., Aguilera A., Giannuzzi L. 2014. Problems on drinking water related to toxigenic Cyanobacteria: some cases studied in Argentina. *Advances in Limnology* 65: 431–444.
- Freshwater algae of North America. Ecology and Classification. 2015. In: Wehr J.D., Sheath R.G., Kociolek J.P. (ed.). Elsevier.

- 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 and Management* 17: 1–14.
- Guidelines for safe recreational water environments. 2003. Vol. 1. Coastal and fresh waters. Geneva: World Health Organization.
- Krienitz L., Dadheech P.K., Fastner J. et al. 2013. The rise of potentially toxin producing cyanobacteria in Lake Naivasha, Great African Rift Valley, Kenya. *Harmful Algae* 27: 42–51.
- Magalhaes V.D., Marinho M.M., Domingos P. et al. 2003. Microcystins (cyanobacteria hepatotoxins) bioaccumulation in fish and crustaceans from Sepetiba Bay (Brasil, RJ). *Toxicol* 42(3): 289–295.
- Oliveira E.D.C., Castelo-Branco R., Silva L. et al. 2019. First detection of microcystin-LR in the amazon river at the drinking water treatment plant of the municipality of Macapá, Brazil. *Toxins* 11(11): 669.
- Parmar T.K., Rawtani D., Agrawal Y.K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in life science* 9(2): 110–118.
- Reynolds C.S. 2008. A Changing paradigm of pelagic food webs. *International Review of Hydrobiology* 93 (4–5): 517–531.
- Ribeiro M.S.F., Moutinho F.H.M., Hanisch W.S. et al. 2017. Monitoring of cyanobacterial populations and the detection of cyanotoxin-genes in Billings Reservoir (Diadema/São Paulo, Brazil). *Marine and fresh-water harmful algae* 1: 108–111.
- Shannon C.E., Weaver W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: The University of Illinois Press.
- Sladeczek V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie. Beiheft Ergebnisse der Limnologie* 7: 1–128.
- Somdee T., Kaewsan T., Somdee A. 2013. Monitoring toxic cyanobacteria and cyanotoxins (microcystins and cylindrospermopsins) in four recreational reservoirs (KhonKaen, Thailand). *Environmental monitoring and assessment* 185: 9521–9529.
- Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas*. Suomen Luonnonsuojelun Tuki Oy. Helsinki: Forssa.
- Winder M., Sommer U. 2012. Phytoplankton response to a changing climate. *Hydrobiologia* 698: 5–16.
- Zobkov M., Zobkova M., Galakhina N. et al. 2022. Data on the chemical composition of Lake Onego water in 2019–2021. Data in Brief. Available online. Accepted 15 March 2022. DOI: [10.1016/j.dib.2022.108079](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108079)
- Абакумов В.А. 1977. Контроль качества вод по гидробиологическим показателям в системе гидрометеорологической службы СССР. В: Абакумов В.А. (ред), *Научные основы контроля качества поверхностных вод по гидробиологическим показателям*. Л.: Гидрометеиздат, с. 93–99.
- Барнинова С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio.
- Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. 1989. *Водоросли. Справочник*. Киев: Наукова Думка.
- Вислянская И.Г., Куликова Т.П., Полякова Т.Н. и др. 1999. Современное состояние гидробиоценозов района Кижских шхер Онежского озера. *Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии»* 1: 113–120.
- Водоросли, вызывающие «цветение» водоемов Северо-запада России. 2006. В: Виноградова К.Л. (ред.). Москва: Товарищество научных изданий КМК.
- Голубев А.И. 1999. Геологическое строение района заказника «Кижские шхеры». *Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии»* 1: 4–10.
- Гутельмахер Б.Л. 1986. Метаболизм планктона как единого целого: Трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона. Ленинград: Наука.
- Дейнес Ю.Е. 2013. Геологическое строение острова Кижы по геофизическим данным. В: *Материалы XXIV Молодёжной научной конференции, посвящённой памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии северо-запада России»*. Апатиты, 7–10 октября 2013 г. Апатиты: Изд-во К & М, с. 43–45.
- Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И. и др. 1951. *Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 4*. Москва: Советская наука.
- Зобков М.Б., Ефремова Т.А. 2023. Содержание микропластика в донных осадках озер особо охраняемых природных территорий на примере Кижских шхер Онежского озера и оз. Водлозеро. *Водные ресурсы* 50(3): 1–12.
- Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. и др. 2023. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла а, продукция фитопланктона. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621189. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (RU). Дата регистрации в реестре баз данных 12 апреля 2023 г.
- Капитонова С.А. 2008. Кижы: Экологические проблемы. В: Регеранд Т.И., Кухарев В.И., Филатов Н.Н., Потахин С.Б., Назарова Л.Е., Полякова Т.Н. (ред), *Водная среда: комплексный подход к изучению, охране и использованию*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, с. 108–112.
- Китаев С.П. 2007. *Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.
- Кузьмин Г.В. 1975. *Фитопланктон*. В: Мордухай-Болтовской Ф.Д. (ред.), *Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов*. Москва, с. 73–84.
- Макушин А.В. 1974. Библиографический указатель по теме «Биологический анализ качества вод» с приложением списка организмов индикаторов загрязнения. Ленинград: Наука.
- Матвиенко А.М. 1954. *Золотистые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 3*. Москва: Советская наука.
- Одум Ю. 1986. *Экология: в 2-х томах. Том 1*. Москва: Мир.
- Озера Карелии. Справочник. 2013. В: Филатов Н.Н., Кухарев В.И. (ред.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.
- Оксиук 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: Карельский научный центр РАН.
- Отчет о деятельности Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижы». 2023. В: Базегской Е.Б. (ред.). Петрозаводск: Издательский центр музея-заповедника «Кижы».
- Протасов Ю.Г. 1999. Некоторые актуальные вопросы антропогенного воздействия на территории охранной зоны музея-заповедника «Кижы». *Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии»* 1: 126–131.

Сабылина А.В., Ефремова Т.А., Рыжаков А.В. и др. 2012. Биогенные элементы и органическое вещество в Онежском озере и его заливах. Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. В: Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, С. 75–78.

Сабылина А.В., Рыжаков А.В. 2007. Химический состав воды озера. Онежское озеро и его притоки. В: Лозовик П.А., Куликова Т.П., Мартынова Н.Н. (ред.), Состояние водных объектов Республики Карелия по результатам мониторинга 1998-2006 гг. Петрозаводск, С. 29–40.

Сабылина А.В. 1999. Современный гидрохимический режим озера. В: Филатов Н.Н. (ред.), Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск, С. 58–99.

Семенченко В.П. 2014. Влияние высшей водной растительности на планктонное сообщество в литоральной зоне озер. В: Материалы международной научной конференции, посвященной 40-летию образования кафедры общей экологии и методики преподавания биологии. Минск, 23–25 октября 2014. Минск, С. 49–51.

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.

Теканова Е.В., Калинин Н.М., Макарова Е.М. и др. 2023. Современное трофическое состояние и качество воды Онежского озера. Биология внутренних вод 6: 740–746.

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

Чекрыжева Т.А. 2008. Фитопланктон как компонент биоресурсной базы озера. В: Кухарев В.И., Лукин А.А. (ред.), Биоресурсы Онежского озера. Петрозаводск, С. 24–36.

Чекрыжева Т.А. 2012. Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера. Труды Карельского научного центра РАН 1: 56–69.

Чекрыжева Т.А., Калинин Н.М. 2016. Структура и сезонная динамика фитопланктонных сообществ в открытой и закрытой литорали Онежского озера (Пиньгуба, Пухгинская Бухта). Труды Карельского научного центра Российской академии наук 12: 83–95.