

# Structure and seasonal dynamics of phytoplankton of the Kizhi Island area of Lake Onego

Original Article

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Smirnova V.S., Slastina Yu.L. \*, Zobkova M.V.

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

**ABSTRACT.** An investigation into the phytoplankton condition in the area of Kizhi skerries of Lake Onego during the spring, summer and autumn of 2023 revealed a high level of microalgae development. The quantitative indicators of the phytocenosis characterise this area of Lake Onego as mesotrophic. The classification of the water type in the Kizhi skerries area of Lake Onego is determined by the indicator values of phytoplankton found during the study period and their quantitative development. The water type is thus classified as a  $\beta$ -mesosaprobic pollution zone with water quality class 3, i.e. satisfactorily clean. The most significant increase in quantitative development was observed during the spring and autumn periods, with diatoms and cyanobacteria being the dominant phytoplankton species. In contrast, during the summer months, cyanobacteria, along with golden and green algae, were the primary components of the phytoplankton community. Furthermore, silicon concentrations were decreased from spring to autumn that was caused by increasing abundance and biomass of diatom algae. At the same time, lower values in the ratio of total nitrogen to total phosphorus can be applied as indicator of active production of cyanobacteria. The intensive vegetation of phytoplankton in the Kizhi Island area is related to the area's natural conditions.

**Keywords:** phytoplankton, seasonal dynamics, nutrients, trophic status, water quality, Lake Onego

**For citation:** Smirnova V.S., Slastina Yu.L., Zobkova M.V. Structure and seasonal dynamics of phytoplankton of the Kizhi Island area of Lake Onego // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 729-760. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-729

## 1. Introduction

In the northwestern part of Lake Onego in the Republic of Karelia, there is a system of islands which differs from all other areas of the lake by virtue of its unique geological structure (Golubev, 1999; Deines, 2013). The Kizhi archipelago is designated as a specially protected area, where the conditions for the development of terrestrial and aquatic biocenoses have been established (Khokhlova and Semina, 1988; Kapitonova, 2008).

The phytoplankton community in the area of Kizhi skerries in the 1960s and 1970s differed from those in other areas of Lake Onego, with higher development indicators. This was due to the special landscape conditions in this area, such as rapidly warming shallow water, slow water exchange and comparative isolation from the lake (Vislyanskaya et al., 1999; Chekryzheva, 2008; Petrova, 1971). Consequently, the earlier warming of the water mass and its intensive mixing are observed in spring, as a consequence of

the separation of the thermobar skerries from the main lake water area and the establishment of direct thermal stratification with higher water surface temperatures for Lake Onego (Petrova, 1971). Consequently, the seasonal phases of phytoplankton development in this water area may occur earlier in comparison to the deep-water areas of the lake (Petrova, 1971). However, despite the aforementioned conditions, the level of microalgae development in the early period of the study (60-70s) remained within the limits of oligotrophy (Chekryzheva, 2008).

However, in 1990, the architectural ensemble of the Kizhi Pogost, located on Kizhi Island, one of the largest islands in the Kizhi archipelago, was included in the UNESCO World Cultural Heritage List (Onego Lake. Atlas, 2010). At these years, anthropogenic impact was intensified at the Kizhi Island area. Concentrations of total phosphorus were increased up to 25  $\mu\text{g/l}$  with increasing of domestic wastewaters discharge (Galakhina et al., 2022) and water transport influence was lead to increasing of oil products in

\*Corresponding author.

E-mail address: [jls@inbox.ru](mailto:jls@inbox.ru) (Yu.L. Slastina)

**Received:** February 11, 2025; **Accepted:** August 12, 2025;

**Available online:** August 31, 2025

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



water from 0.15 to 0.6 mg/l (Sabylina, 1999; Protasov, 1999; Sabylina and Ryzhakov, 2007; Sabylina et al., 2012; Galakhina et al., 2022). In consequence of the heightened anthropogenic load in the area during the 1990s, alterations in the structure and quantitative level of algae development were observed in the phytocenosis of the Kizhi skerries area of Lake Onego, which resulted in an augmentation of the trophic status from oligotrophic to mesotrophic (Vislyanskaya et al., 1999). This level of phytoplankton development was sustained in the 2000s (Chekryzheva and Vislyanskaya, 2000; Chekryzheva, 2008).

The increase in air temperature has led to an increase in the duration of the open water period and the onset of 'biological' summer, resulting in an elevated average water surface temperature of Lake Onego (Filatov et al., 2020; Efremova and Palshin, 2015). In light of the observed climatic shifts impacting the temperature dynamics of Lake Onego and the direct anthropogenic influence on the Kizhi skerries region, the objective of this study is twofold. Firstly, it seeks to provide a comprehensive characterisation of the contemporary phytoplankton structure. Secondly, it aims to undertake a quantitative analysis of its seasonal development. Additionally, the study will assess the water quality of the study area by evaluating the indicator values of microalgae species.

## 2. Materials and methods of research

Kizhi Island is located in the northern part of Lake Onego (61°42'N, 35°25'E), the second largest freshwater lake in Europe. The lake is part of the Baltic Sea basin, surface area of 9720 km<sup>2</sup> and mean and maximal depth 31 m and 120 m respectively. Water renewal time of lake is 15.6 years. The lake waters is characterized as mesohumic, weakly alkaline waters of the hydrocarbonate-calcium type (Lakes of Karelia, 2013).

Water samples for qualitative and quantitative assessment of the phytoplankton and nutrient concen-

trations were taken in the surface layer (0.5 m) in the area of Kizhi Island in Lake Onego. The samples were collected at stations Z\_1, Z\_2, Z\_3 and Z\_4 (Fig. 1) on 29 May, 31 July and 23 September 2023.

Water samples ( $V=0.5$  l) were collected with a Ruttner bathometer and fixed with 10 ml of 40% formalin. The concentration of water samples for microalgae analysis was then carried out on membrane filters ( $D_{\text{pore}}=0.8$   $\mu\text{m}$ ) to a volume of 5 ml (Methods of Hydrobiological..., 2024; Fedorov, 1979). The calculation of abundance ( $N_{\text{tot}}$ ) and the determination of phytoplankton were carried out using a Mikmed-6 microscope. The following identifiers were utilised to identify the species composition of the algoflora (Zabelina et al., 1951; Matvienko, 1954; Kiselev, 1954; Tikkanen, 1986; Komárek, 1998; 2005; 2013; Krammer and Lange-Bertalot, 1986; 1991). The microalgae biomass ( $B_{\text{tot}}$ ) was calculated using the stereometric method, whereby the volume of each cell was calculated. Species exhibiting abundance and/or biomass greater than 10% were designated as dominant species, while those with abundance and/or biomass greater than 5% were classified as subdominant. The indicator significance of phytoplankton species was described using the following materials (Sladeczek, 1973; Makrushin, 1974; Wasser et al., 1989; Barinova et al., 2006). The saprobic index (S) of water was calculated according to the Pantle-Buck method modified by Sladeczek (Sladeczek, 1973), and the saprobic zone was determined according to Oksiyuk et al. (1993). In order to perform a statistical analysis of the phytoplankton status of the Kizhi skerries area of Lake Onego, it is first necessary to obtain more regular data series on phytoplankton development in this area ( $n<5$ ), with the exception of summer observations ( $n=14$ ). The quantitative indices obtained in 2023 were then compared with the recorded phytoplankton data (Syarki et al., 2015) from the period between 1996 and 2010, using a confidence interval (Ivanter and Korosov, 2010).

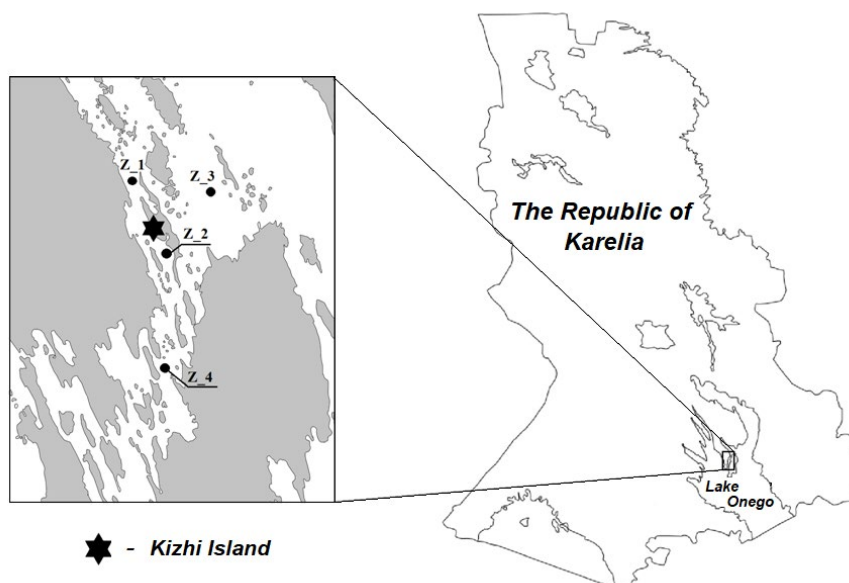


Fig.1. Water sampling location for phytoplankton and nutrients analysis in the Kizhi skerries area of Lake Onego.

The measurement of chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations in water was conducted using the standard spectrophotometric method (GOST 17.1.4.02-90). Nutrient concentrations (total phosphorus (TP), mineral phosphorus (P-PO<sub>4</sub>), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Si) were determined according to standard methods (Analytical..., 2017). The total nitrogen (TN) concentrations were determined by high-temperature oxidation on a Shimadzu TOC-LCSN analyser in accordance with the method specified in PND F 14.1:2:3:4.279-14 (environmental regulations federative documents). The organic nitrogen (N<sub>org</sub>) concentrations were calculated by the difference between TN and mineral forms of nitrogen.

Water surface temperature during the study period was measured using a CastAway-CTD instrument, and a registered database was used to compare surface water temperature in the study area with earlier observations (Kalinkina et al., 2023). The trophic state of the Kizhi Island area of Lake Onego in 2023 was assessed according to the classifications of lake types presented in the work of S.P. Kitaev (2007), and in terms of total phosphorus content in water – according to P.A. Lozovik (2013).

### 3. Results

During the study period, 204 taxa ranked below genus were identified in the phytoplankton in the Kizhi skerries of Lake Onego, belonging to 7 systematic divisions: Bacillariophyta - 76 (37.2%); Chlorophyta - 54 (26.5%); Cyanobacteria - 33 (16.2%); Chrysophyta - 26 (12.7%); Euglenophyta - 5 (2.5%); Cryptophyta - 6 (2.9%); Dinophyta - 4 (2%) (Table 1).

### 3.1. Water surface temperatures and nutrient content in water during the study period

In May 2023, the surface water temperature in the Kizhi skerries area of Lake Onego ranged from 14.2 to 15.8°C, in July it ranged from 17.4 to 18.5°C, and in September it ranged from 14.4 to 14.6°C (Fig. 2).

Nutrient concentrations (P, N, Si) were similar between all stations of Kizhi Island area in 2023 (see Table 2). During the spring and summer periods, the concentrations of TP (1-12 µg/l) were remained within the limits of oligotrophy. However, in September, the concentrations of TP (10-17 µg/l) were increased, reaching levels indicative of oligo-mesotrophy. The nitrogen forms were exhibited comparable concentrations at all stations throughout the study period. The predominant nitrogen form in the TN composition was N<sub>org</sub>, with its share increasing from 67.7% in May to 76% in July and 96.3% in September (see Table 2).

In summer, increasing of nitrate concentrations and decreasing of ammonium concentrations were observed at all stations in comparison to the spring. By autumn, the concentrations of nitrogen mineral forms were decreased to minimum values. The silicon concentrations were decreased from spring to autumn (Table 2).

### 3.2. Spring development of phytoplankton

In May 2023, a total of 97 species and intraspecific taxa, categorised below the rank of genus within the domain of algae, were identified in the Kizhi Island

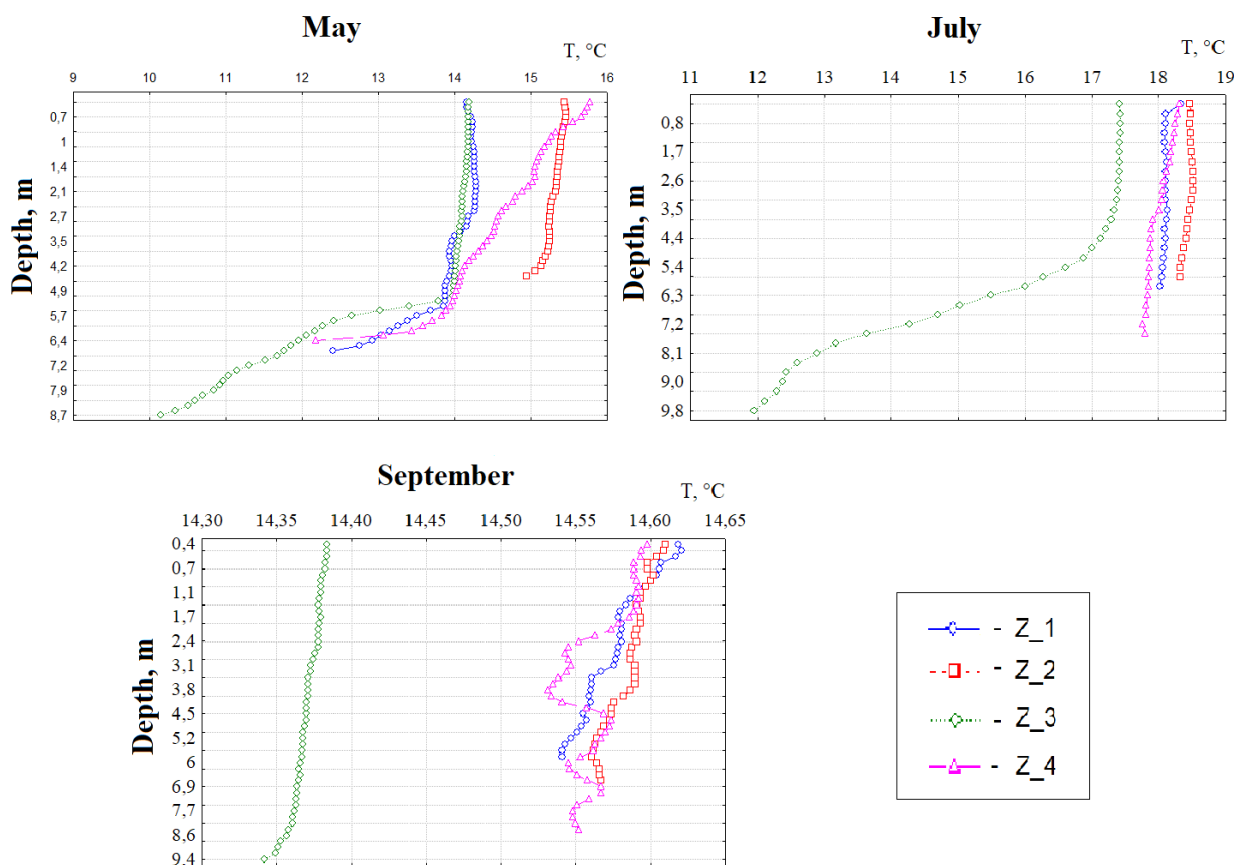


Fig.2. Surface water temperature of the studied area of Kizhi Island, Onego Lake, in May, July and September 2023.

**Table 1.** List of phytoplankton species in the area of Kizhi skerries of Lake Onego in different seasons of 2023.

№	Species composition	Seasons of the year		
		Spring	Summer	Autumn
Cyanobacteria				
1	<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv.	+	+	-
2	<i>Merismopedia punctata</i> Meyen (= <i>Merismopedia tranquilla</i> (Ehr.) Trev.)	DN	+	+
3	<i>Aphanocapsa elachista</i> var. <i>elachista</i> W. et G. S. West	DN	DN	-
4	<i>Aphanocapsa incerta</i> (Lemm.) Cronb. et Kom.	DN	-	DN
5	<i>Aphanocapsa delicatissima</i> W. et G. S. West	-	-	+
6	<i>Aphanothece clathrata</i> f. <i>clathrata</i> W. et G.S. West	-	DN	DN
7	<i>Aphanothece clathrata</i> var. <i>brevis</i> (Bachm.) Elenk.	-	+	-
8	<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i> Näg.	-	-	+
9	<i>Gloeocapsa limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. (= <i>Croococcus limneticus</i> Lemm.)	+	DN	+
10	<i>Gloeocapsa magma</i> (Bréb.) Kütz. em. Hollerb.	-	+	-
11	<i>Gloeocapsa minima</i> ampl. f. <i>minima</i> (Keissl.) Hollerb.	-	+	-
12	<i>Gloeocapsa minor</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Croococcus minor</i> (Kütz.) Näg.)	-	+	-
13	<i>Gloeocapsa minor</i> f. <i>dispersa</i> (Keis.) Hollerb.	-	+	+
14	<i>Gloeocapsa montana</i> f. <i>montana</i> (Kütz.) Hollerb.	-	+	-
15	<i>Gloeocapsa punctata</i> Näg. em. Hollerb.	-	+	-
16	<i>Gloeocapsa turgida</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Chroococcus turgidus</i> (Kütz.) Näg.)	-	+	-
17	<i>Gloeocapsa vacuolata</i> (Skuja) Hollerb.	-	+	-
18	<i>Gloeocapsa varia</i> (A. Br.) Hollerb. (= <i>Chroococcus varius</i> A. Br.)	-	+	-
19	<i>Gomposphaeria lacustris</i> Chod. (= <i>Snowella lacustris</i> (Chod.) Kom. et Hind.)	-	DN	SDN
20	<i>Gomposphaeria lacustris</i> f. <i>compacta</i> Lemm.	-	-	DN
21	<i>Gomposphaeria aponina</i> Kütz.	-	+	-
22	<i>Snowella litoralis</i> (Häyrén) Kom. et Hind.	+	-	-
23	<i>Woronichinia naegeliana</i> (Ung.) Elenk.	-	+	-
24	<i>Oscillatoria planctonica</i> Wolosz. (= <i>Limnothrix planctonica</i> (Wolosz.) Meff.)	+	+	-
25	<i>Oscillatoria agardhii</i> Gom. (= <i>Planktothrix agardhii</i> (Gom.) Anagn. et Kom.)	-	+	-
26	<i>Oscillatoria tenuis</i> Ag. ex Gom. (= <i>Phormidium konstantinosum</i> (Ag.) Umezaki et Watanabe)	SDB	-	+
27	<i>Oscillatoria limosa</i> Ag. et Gom.	-	-	DN
28	<i>Phormidium mucicola</i> Naum. et Hub.-Pestal.	-	+	-
29	<i>Dolichospermum spiroides</i> (Kleb.) Wack. et al.	+	DN	+
30	<i>Dolichospermum flos-aquae</i> (Born. et Flah.) Wack. et al.	-	+	-
31	<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Rich.) Wack. et al.	+	-	+
32	<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz.	-	+	+
33	<i>Microcystis delicatissima</i> (W. et G. S. West) Starm.	-	-	+
Cryptophyta				
34	<i>Rhodomonas lacustris</i> Pasch. et Rut.	+	+	+
35	<i>Chroomonas acuta</i> Uterm.	-	+	-
36	<i>Chroomonas brevicilcata</i> Näg.	-	+	-
37	<i>Cryptomonas erosa</i> Ehr.	+	+	+
38	<i>Cryptomonas woloszyńskae</i> Czozn.	-	+	-
39	<i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.	-	+	+
Dinophyta				
40	<i>Glenodinium edax</i> Schill. (= <i>Tyrannodinium edax</i> (Schill.) Cal.)	-	+	-
41	<i>Peridinium cinctum</i> (Müll.) Ehrb.	-	+	-
42	<i>Peridinium inconspicuum</i> Lemm.	+	-	+
43	<i>Ceratium hirundinella</i> (Müll.) Schrank	SDB	+	-
Chrysophyta				
44	<i>Chrysococcus cordiformis</i> Naum.	+	+	-
45	<i>Chrysococcus ovalis</i> Lac. (= <i>Kephyrion ovale</i> (Lac.) Hub.-Pest.)	SDN	-	+
46	<i>Chrysococcus rufescens</i> var. <i>rufescens</i> Klebs.	-	+	-

№	Species composition	Seasons of the year		
		Spring	Summer	Autumn
47	<i>Chrysococcus punctiformis</i> Pasch.	–	+	–
48	<i>Kephyrion ovum</i> Pasch.	+	+	+
49	<i>Kephyrion spirale</i> Conrad.	+	–	+
50	<i>Kephyrion cupuliforme</i> Conrad.	–	+	–
51	<i>Kephyrion moniliferum</i> (Schmid.) Bourelly (= <i>Stenokalyx moniliferus</i> Schmid.)	+	+	+
52	<i>Dinobryon bavaricum</i> Imh.	SDN	+	+
53	<i>Dinobryon cylindricum</i> Imh.	SDN	+	+
54	<i>Dinobryon divergens</i> Imh.	DN	DN;DB	+
55	<i>Dinobryon sertularia</i> Ehr.	–	+	–
56	<i>Dinobryon sociale</i> Ehr.	–	+	–
57	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i> (Stein) Lemm. (= <i>Dinobryon stipitatum</i> Stein.)	–	+	–
58	<i>Dinobryon suecicum</i> Lemm.	–	+	–
59	<i>Dinobryon spirale</i> Iwan.	+	–	+
60	<i>Pseudokephyrion entzii</i> Corn.	+	+	–
61	<i>Mallomonas acaroides</i> Perty em. Iwan.	+	–	+
62	<i>Mallomonas elongata</i> Reverd.	–	–	+
63	<i>Mallomonas caudata</i> Iwan.	–	+	–
64	<i>Mallomonas coronata</i> Boloch.	+	+	–
65	<i>Mallomonas tonsurata</i> Teil.	–	–	+
66	<i>Mallomonas fresenii</i> Kent.	–	+	–
67	<i>Bitrichia chodatii</i> (Reverd.) Chodat.	–	+	–
68	<i>Synura uvella</i> Ehr.	+	–	+
69	<i>Chrysopyxis urna</i> Korsh.	–	+	–
Bacillariophyta				
70	<i>Stephanodiscus astraea</i> (Kütz.) Grun. (= <i>Cyclotella astraea</i> Kütz.)	+	–	–
71	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.	+	+	+
72	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz. (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>meneghiniana</i> Kütz.)	–	+	–
73	<i>Cyclotella schumannii</i> (Grun.) Håkansson (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>schumannii</i> Grun.)	–	+	–
74	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. ex Kütz.	–	+	–
75	<i>Discostella stelligera</i> (Cleve et Grun.) Houk et Klee (= <i>Cyclotella meneghiniana</i> var. <i>stelligera</i> )	–	+	+
76	<i>Puncticulata bodanica</i> (Eulens. ex Grun.) Håkansson (= <i>Cyclotella bodanica</i> Eulens. ex Grun.)	+	DB	+
77	<i>Puncticulata comta</i> (Kütz.) Håkansson. (= <i>Cyclotella comta</i> Kütz.)	+	+	+
78	<i>Puncticulata radiosa</i> (Grun.) Håkansson (= <i>Cyclotella comta</i> var. <i>radiosa</i> Grun.)	+	+	+
79	<i>Melosira varians</i> Ag.	+	+	–
80	<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müll.) Sim. (= incl. f. <i>curvata</i> O. Müll., f. <i>islandica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica</i> O. Müll.)	DB;DN	+	DB
81	<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Sim. (= <i>Gaillonella granulata</i> Ehr.)	+	DB	SDB
82	<i>Aulacoseira distans</i> (Ehr.) Sim. (= <i>Gaillonella distans</i> Ehr.)	+	–	+
83	<i>Aulacoseira alpigena</i> Grun. Kram. (= <i>Melosira distans</i> var. <i>alpigena</i> Grun.)	–	–	+
84	<i>Aulacoseira italica</i> f. <i>italica</i> (Ehr.) Dav. (= <i>Aulacoseira italica</i> (Ehr.) Sim.; <i>Gaillonella italica</i> Ehr.)	+	+	+
85	<i>Aulacoseira subarctica</i> (Müll.) Haw. em. Genkal (= <i>Melosira italica</i> ss. <i>subarctica</i> (Müll.))	+	–	+
86	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun.) Sim.	–	+	–
87	<i>Fragilaria constricta</i> Ehr.	–	+	–
88	<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt.	+	+	DB;DN
89	<i>Fragilaria pinnata</i> Ehr.	+	+	–
90	<i>Synedra acus</i> Kütz.	–	+	+
91	<i>Synedra amphicephala</i> var. <i>amphicephala</i> Kütz.	–	+	–
92	<i>Synedra ulna</i> var. <i>ulna</i> (Nitzsch.) Ehr.	+	–	+
93	<i>Asterionella formosa</i> var. <i>formosa</i> Hass.	SDN	+	SDB

№	Species composition	Seasons of the year		
		Spring	Summer	Autumn
94	<i>Diatoma tenuis</i> Ag. (= <i>D. elongatum</i> (Lyngb.) Ag.; <i>Diatoma tenuis</i> var. <i>elongatum</i> Lyngb.)	–	+	–
95	<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz. (= <i>Diatoma fenestrata</i> Lyngb.)	DB;DN	DB;DN	DB;DN
96	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz. (incl. var. <i>ventricosa</i> (Kütz.) Grun.) (= <i>T. ventricosa</i> Kütz.; <i>Conferva flocculosa</i> Roth.)	+	+	+
97	<i>Achnanthes calcar</i> Cl. (= <i>Gliviczia calcar</i> (Cl.) Kulikov., Lang.- Bert. et. Witkow.	–	+	–
98	<i>Achnanthes lanceolata</i> (Breb. exKütz.) Grun.	+	–	–
99	<i>Achnanthes borealis</i> Cl.	+	–	–
100	<i>Achnanthes gracillima</i> Hust.	+	–	+
101	<i>Eunotia praerupta</i> var. <i>praerupta</i> Ehr.	–	+	–
102	<i>Eunotia septentrionalis</i> Østr.	+	–	–
103	<i>Eunotia formica</i> Ehr.	–	–	+
104	<i>Eunotia sudetica</i> Müll.	–	–	+
105	<i>Meridion circulare</i> (Grev.) Ag.	+	–	–
106	<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kütz.) Rabenh.	DB	–	+
107	<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehr.	–	–	+
108	<i>Gomphonema constrictum</i> Ehr.	+	–	–
109	<i>Gomphonema parvulum</i> (Kütz.) Kütz.	–	–	+
110	<i>Pinnularia viridis</i> var. <i>viridis</i> (Nitzsch.) Ehr.	SDB	–	–
111	<i>Pinnularia interrupta</i> W. Sm.	+	–	–
112	<i>Surirella dydima</i> var. <i>dydima</i> Kütz.	+	–	–
113	<i>Navicula dicephala</i> (Ehr.) W. Sm.	–	+	–
114	<i>Navicula cryptocephala</i> var. <i>cryptocephala</i> Kütz.	+	–	+
115	<i>Navicula gracilis</i> Ehr.	+	–	+
116	<i>Navicula exigua</i> (Greg.) Grun.	–	–	+
117	<i>Navicula longirostris</i> Hust.	–	+	–
118	<i>Navicula rotaeana</i> (Rabench.) Grun.	–	+	–
119	<i>Navicula radiosa</i> Kütz.	+	–	–
120	<i>Navicula salinarum</i> f. <i>capitata</i> Schulz	–	+	–
121	<i>Cocconeis pediculus</i> Ehr.	–	+	–
122	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>placentula</i> Ehr.	SDB	–	–
123	<i>Diploneis smithii</i> var. <i>smithii</i> (Bréb.) Cl.	–	+	–
124	<i>Diploneis elliptica</i> var. <i>elliptica</i> (Kütz.) Cl.	–	+	–
125	<i>Eucoconeis elliptica</i> Savel. – Dolg.	SDB	–	–
126	<i>Eucoconeis onegensis</i> Wisl. et Kolbe	DB	–	–
127	<i>Frustulia rhomboides</i> var. <i>saxonica</i> (Rabenh.) D. T.	–	+	–
128	<i>Cymbella lanceolata</i> var. <i>lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. (incl. var. <i>notata</i> Wisl. et Poretzky)	–	+	–
129	<i>Cymbella ventricosa</i> var. <i>ventricosa</i> Kütz.	–	+	–
130	<i>Cymbella pusilla</i> Grun.	+	–	–
131	<i>Cymatopleura solea</i> var. <i>apiculata</i> (W. Sm.) Ralfs	–	+	–
132	<i>Neidium iridis</i> var. <i>iridis</i> (Ehr.) Cl.	–	+	–
133	<i>Amphora coffeaformis</i> var. <i>coffeaformis</i> (Ag.) Kütz.	–	+	–
134	<i>Amphora ovalis</i> (Kütz.) Kütz. (incl. var. <i>gracilis</i> (Ehr.) Cl.)	–	+	–
135	<i>Amphora pediculus</i> (Kütz.) Grun. (= <i>A. ovalis</i> var. <i>pediculus</i> (Kütz.) V.H.)	–	+	–
136	<i>Amphora copulata</i> (Kütz.) Schoem. et Archib. (= <i>Frustulia copulata</i> Kütz.)	+	–	–
137	<i>Amphiprora ornata</i> Bail.	–	+	–
138	<i>Nitzschia acicularis</i> (Kütz.) W. Sm.	–	+	–
139	<i>Nitzschia angustata</i> var. <i>angustata</i> (W. Sm.) Grun.	–	+	–
140	<i>Nitzschia acuta</i> Cl.	+	–	–
141	<i>Nitzschia dissipata</i> (Kütz.) Raben. (= <i>Synedra dissipata</i> Kütz.)	+	+	+
142	<i>Nitzschia hungarica</i> Grun.	–	+	–
143	<i>Nitzschia tryblionella</i> var. <i>levidensis</i> (W. Sm.) Grun.	–	+	–
144	<i>Nitzschia tubicola</i> Grun.	+	–	+
145	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. ex Kütz. (incl. var. <i>costatum</i> (W. Sm.) Grun.)	–	+	–

№	Species composition	Seasons of the year		
		Spring	Summer	Autumn
Euglenophyta				
146	<i>Trachelomonas volvocina</i> var. <i>volvocina</i> Ehr. (Ehr.)	–	+	–
147	<i>Trachelomonas volvocina</i> var. <i>subglobosa</i> Lemm. sens. Swir.	–	+	–
148	<i>Trachelomonas intermedia</i> Dang.	+	–	+
149	<i>Euglena caudata</i> Hübn.	+	–	–
150	<i>Euglena proxima</i> Dang.	+	–	+
Chlorophyta				
151	<i>Chlamydomonas globosa</i> Snow	–	+	–
152	<i>Chlamydomonas incerta</i> Pasch.	–	+	–
153	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> Dang.	SDN	SDN	+
154	<i>Chlamydomonas monadina</i> (Ehr.) Stein	+	+	+
155	<i>Lobomonas stellata</i> Chod.	–	+	–
156	<i>Gonium sociale</i> (Dujard.) Warm.	–	+	–
157	<i>Pteromonas torta</i> Korsh.	–	+	–
158	<i>Phacotus lenticularis</i> (Ehr.) Dies.	+	+	–
159	<i>Eudorina elegans</i> Ehr.	+	+	–
160	<i>Pandorina morum</i> (Müll.) Bory	–	+	–
161	<i>Planktosphaeria gelatinosa</i> Smith.	–	+	–
162	<i>Sphaerocystis schroeteri</i> Chod.	+	+	–
163	<i>Didymocystis bicellularis</i> (Chod.)Kom. (= <i>Desmodesmus bicellularis</i> (Chod.) An)	+	–	–
164	<i>Didymocystis incospicua</i> Korsch. (= <i>Pseudodidymocystis incospicua</i> (Korsh.) Hind.)	–	–	+
165	<i>Pediastrum duplex</i> Meyen.	–	+	–
166	<i>Coenococcus planctonicus</i> Korsh.	+	DN	–
167	<i>Coenochloris fottii</i> (Hind.) Tsarenko	SDB	–	–
168	<i>Coenochloris ovalis</i> Korsh.	–	+	–
169	<i>Stichococcus subtilis</i> (Kütz.) Klerc.	+	–	–
170	<i>Chlorella vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i> Beij.	+	+	+
171	<i>Tetrachlorella alternans</i> (Smith) Korsh.	+	–	–
172	<i>Oocystis elliptica</i> West	–	+	–
173	<i>Oocystis lacustris</i> Chod.	–	+	–
174	<i>Oocystis submarina</i> Lag.	–	+	–
175	<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Kom.-Leg.	SDN	+	+
176	<i>Monoraphidium griffithii</i> (Berk.) Kom.- Leg.	+	–	–
177	<i>Ankyra juday</i> (Smith) Fott	–	+	–
178	<i>Coelastrum cambricum</i> Arch.	–	+	–
179	<i>Coelastrum sphaericum</i> Näg.	–	+	–
180	<i>Botryococcus braunii</i> Kütz.	+	+	–
181	<i>Crucigenia quadrata</i> Mor.	–	DN	–
182	<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirch.) Kuntz. (= <i>Lemmermannia tetrapedia</i> (Kirch.) Lem.	+	+	+
183	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Bréb.	–	SDN	–
184	<i>Scenedesmus bijugatus</i> var. <i>bijugatus</i> (Turp.) Kütz. (= <i>S. ecornis</i> .f. <i>ecornis</i> (Ralfs.) Chod)	+	–	–
185	<i>Scenedesmus obtusus</i> Mey.	–	–	+
186	<i>Desmodesmus armatus</i> (Chod.) Heg.	+	–	+
187	<i>Elakatothrix genevensis</i> (Reverd.) Hind.	–	+	+
188	<i>Elakatothrix gelatinosa</i> Wille	+	–	–
189	<i>Ankistrodesmus graciles</i> (Rein.) Korsh. (= <i>Messastrum gracile</i> (Rein.) Garc.	+	–	–
190	<i>Ankistrodesmus fusiformis</i> Corda	–	–	+
191	<i>Cosmarium ornatum</i> var. <i>ornatum</i> Ralfs ex Ralfs	–	+	–
192	<i>Cosmarium bioculatum</i> Bréb. ex Ralfs	+	–	+
193	<i>Cosmarium phaseolus</i> Bréb. ex Ralfs	–	–	+
194	<i>Kirchneriella contorta</i> (Shmidle) Bohl. (= <i>Raphidocelis danubiana</i> (Hind.) Marv. et al.)	–	+	–



№	Species composition	Seasons of the year		
		Spring	Summer	Autumn
195	<i>Korschikoviella limnetica</i> (Lemm.) Silva	+	+	-
196	<i>Koliella spiculiformis</i> (Visch.) Hind.	+	+	+
197	<i>Koliella longiseta</i> (Visch.) Hind.	+	+	+
198	<i>Koliella spirotaenia</i> (West) Hind.	-	+	-
199	<i>Ulothrix zonata</i> var. <i>zonata</i> (Web. et. Mohr.) Kütz.	-	+	-
200	<i>Gloeotila spiralis</i> Chod. (= <i>Stichococcus contortus</i> (Lemm.) Hind.)	-	+	-
201	<i>Closterium gracile</i> var. <i>gracile</i> Bréb. ex Ralfs	+	+	-
202	<i>Closterium pusillum</i> Hantz.	+	+	-
203	<i>Staurastrum paradoxum</i> Mey. ex Ralfs	-	+	+
204	<i>Staurastrum longipes</i> (Nord) Teil. (= <i>Staurastrum paradoxum</i> var. <i>longipes</i> Nord.)	-	-	+

**Note:** '+' – species is present in the phytoplankton community; '-' – species is absent in the phytoplankton community; SDN – subdominant species for abundance; SDB – subdominant species for biomass; DN – dominant species for abundance; DB – dominant species for biomass.

area. These taxa belonged to seven distinct systematic groups: Bacillariophyta - 38 (39.2%); Chlorophyta - 30 (31%); Cyanobacteria - 10 (10.3%); Chrysophyta - 12 (12.3%); Euglenophyta - 3 (3%); Cryptophyta - 2 (2.1%); Dinophyta - 2 (2.1%).

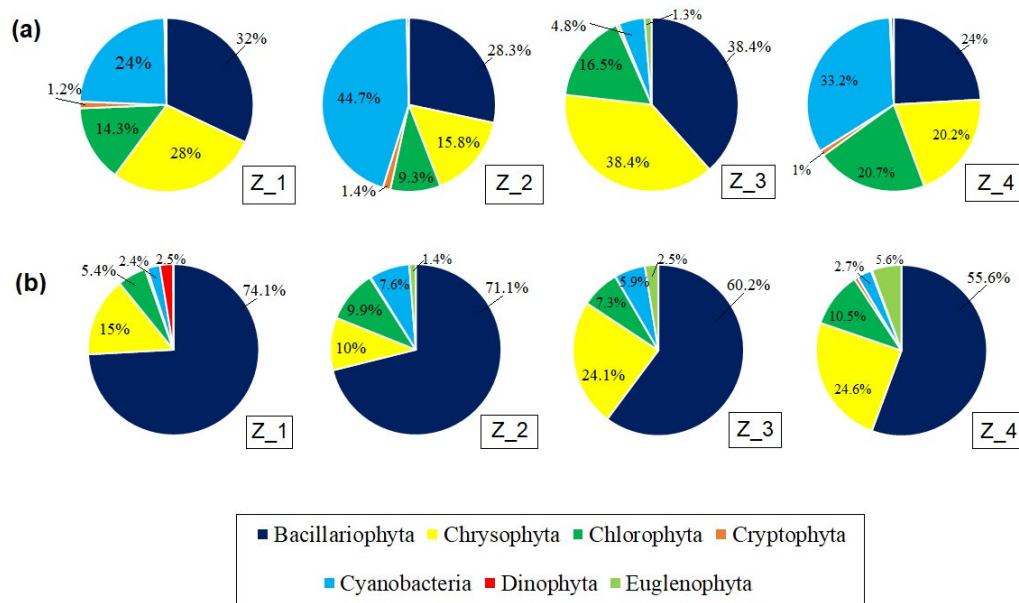
In the spring of 2023, at station Z\_1, diatom algae were found to be predominant, accounting for 32% of abundance (N) and 74.1% of biomass (B). The most prevalent species of diatoms were *Aulacoseira islandica* (16.4% of  $B_{tot}$ ), *Euocconeis onegensis* (11.5% of  $B_{tot}$ ), and *Tabellaria fenestrata* (11% of  $B_{tot}$ ). The dominant complex further included golden algae (28% by N; 15% by B) (dominant *D. divergens* 11.2% of  $N_{tot}$ ) and cyanobacteria (24% by N; 2.4% by B) (dominant *Aphanocapsa inserta* - 20.3% of  $N_{tot}$ ) (Fig. 3). In the vicinity of the water transport pier on Kizhi Island, where the Kizhi Museum-Reserve is situated (station Z\_2), cyanobacteria (44.7%) predominated in terms of N, with *Aphanocapsa elachista* contributing up to 27% of  $N_{tot}$ , followed by diatoms (28.3%), predominantly *A. islandica* (15% of  $N_{tot}$ ) and golden algae (15.8%) - species of the genus *Dinobryon*. By B, diatoms dominated up to 71.1% (*A. islandica* - 38% of  $B_{tot}$ ) (see Fig. 3).

In the vicinity of station Z\_3, on the eastern side of the island, diatoms and golden algae dominated N and B (N - 38.4% contribution of each department; B - 60.2% and 24.1%, respectively). Diatoms were represented by *Tabellaria fenestrata* (31% of  $B_{tot}$ ) and species of the genus *Aulacoseira* (up to 14% of  $N_{tot}$ ), while golden algae consisted of species of the genus *Dinobryon* (dominant: *D. divergens*) (18% of  $N_{tot}$ ) and species of the genus *Kephyrion* (subdominant: *Kephyrion ovale*). In addition, green algae (16.5%) (subdominants: *Monoraphidium contortum*, *Stichococcus subtilis*) also dominated in abundance (see Fig. 3). In the southeastern part of the study area (station Z\_4), cyanobacteria (up to 33.2%) were dominant by N in the spring period, mainly due to the development of *Merismopedia punctata* (16% of  $N_{tot}$ ). Diatoms (24% by N; 55.6% by B) (dominants: *A. islandica* 27% by  $B_{tot}$ ), *Tabellaria fenestrata* 11% by  $B_{tot}$ ) and golden algae (20.2% by N; 24.6% by B) - *D. divergens* (11.2% by  $B_{tot}$ ) were active along N and B. Green algae (up to 20.7% by N; 10.5% by B) (subdominants: *Clamydomonas reinhardii*, *Coenococcus fottii*) were also found to be actively vegetating (see Fig. 3). Cryptophyte (up to 1.4% N), dinophyte (up to 5.6%

**Table 2.** Content of nutrients in the water of the Kizhi skerries area of Lake Onego during the open water period of 2023.

Station	Month of water sampling	TP, µg/l	P-PO <sub>4</sub> , µg/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mgN/l	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , mgN/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mgN/l	TN, mgN/l	N <sub>org</sub> , mgN/l	Si, mgSi/l
Z_1	May	1	4	0.02	0.000	0.03	0.32	0.27	0.53
	July	1	11	0.05	0.001	0.01	0.24	0.17	0.39
	September	1	17	0.01	0.000	0.00	0.27	0.26	0.26
Z_2	May	1	6	0.02	0.000	0.04	0.29	0.23	0.52
	July	2	10	0.05	0.001	0.01	0.24	0.18	0.31
	September	1	10	0.01	0.000	0.00	0.32	0.31	0.25
Z_3	May	1	1	0.02	0.000	0.08	0.31	0.21	0.39
	July	1	8	0.05	0.001	0.04	0.31	0.21	0.28
	September	1	11	0.01	0.000	0.02	0.27	0.23	0.27
Z_4	May	1	5	0.02	0.000	0.04	0.32	0.26	0.47
	July	1	12	0.04	0.001	0.03	0.25	0.19	0.30
	September	1	11	0.01	0.000	0.02	0.28	0.25	0.25





**Fig.3.** Phytoplankton structure in the Kizhi skerries area of Lake Onego (sampling stations Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) in May 2023: (a) - by abundance, (b) - by biomass.

B) and euglena algae (up to 2.5% B) were recorded in the lowest abundance at all survey stations in the Kizhi Island area in May 2023 (see Fig. 3).

The analysis of the saprobiological characteristics of phytoplankton species found in the area of Kizhi skerries of Lake Onego in May 2023 ( $S = 1.6 \pm 0.05$ ) indicates that this type of water can be attributed to the  $\beta$ -mesosaprobic zone (water quality class 3, satisfactorily clean) (see Table 3).

The total microalgae abundance ( $N_{tot}$ ) exhibited a range from 750 to 2003 thousand cells/l, while the total biomass ( $B_{tot}$ ) demonstrated a variation from 0.61 to 1.21 mg/l (refer to Table 3 for further details). In the southeastern part of the study area from Kizhi Island (station Z\_4),  $N_{tot}$  values were higher compared to other stations (see Table 3) due to the growth of the small-cell cyanobacterium *M. punctata* ( $V_{cells} = 14.2 \mu m^3$ ) and medium-sized green algae *C. reinhardtii* ( $V_{cells} = 590.6 \mu m^3$ ) and *C. fottii* ( $V_{cells} =$  up to  $47.8 \mu m^3$ ). The population of  $B_{tot}$  at station Z\_4 was comprised of the large-celled diatoms *A. islandica* ( $V_{cells} =$  up to  $1952 \mu m^3$ ) and *T. fenestrata* ( $V_{cells} = 2059 \mu m^3$ ), as well as the chrysophyte *D. divergens* ( $V_{cells} = 914 \mu m^3$ ). Furthermore, in the vicinity of the water transport pier

on Kizhi Island (station Z\_2),  $N_{tot}$  (see Table 3) attained elevated levels due to the proliferation of cyanobacteria, specifically the small-cell cyanophyte *A. elachista* ( $V_{cells} = 22.5 \mu m^3$ ). The quantitative indicators of planktonic phytocenosis development in the spring period of the study area characterise it as an oligotrophic section of Lake Onego.

The concentration of chlorophyll *a* in water in May 2023 was uniform throughout the area under study, with the exception of station Z\_1, where the lowest value of the pigment ( $2 \mu g/l$ ) was observed. The content of chlorophyll *a* ( $2-4 \mu g/l$ ) in water was within the limits of oligo- $\alpha$ -mesotrophy (see Table 3).

### 3.3. Phytoplankton development during the biological summer period

In July 2023, a total of 138 species and intra-specific taxa ranked below the algal genus from seven systematic groups were identified in the study area: Bacillariophyta, 44 (32%); Chlorophyta, 39 (28.3%); Cyanobacteria, 25 (18%); Chrysophyta, 19 (13.8%); Euglenophyta, 2 (1.5%); Cryptophyta, 6 (4.3%); and Dinophyta, 3 (2.1%).

**Table 3.** Phytoplankton development indicators and saprobic indices in the Kizhi Island area of Lake Onego (May 2023).

Indicator	Sampling stations			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Quantitative indicators				
$N_{tot}$ , thousand cells/l	968	1647	750	2003
$B_{tot}$ , mg/l	0.98	0.96	0.61	1.21
Chlorophyll <i>a</i>				
Chl <i>a</i> , $\mu g/l$	2	3.7	3.6	4
Saprobic index				
S	1.66	1.43	1.59	1.61

During the summer of 2023, a study was conducted in the north-western part of the Kizhi Island (Fig. Z\_1) was dominated by N Chlorophyta (35.5%; dominant *Crucigenia quadrata* - 20.1% of  $N_{tot}$ ) and Cyanobacteria (41.9%) - dominant species - *Gomphosphaeria lacustris* (25.1% of  $N_{tot}$ ), *Gloeocapsa limnetica* (13.6% of  $N_{tot}$ ). Chrysophyta (15.8% and 80%, respectively) were dominated by N and B, with *Dinobryon divergens* (10% of  $N_{tot}$ ; 68% of  $B_{tot}$ ) being the dominant species (Fig. 4). Station Z\_2 was dominated by N Cyanobacteria (52.5%; *Aphanocapsa elachista* - 16.2% of  $N_{tot}$ ) and Chlorophyta (22.7%; species of the genus Chlorococcales). By N and by B, the dominant complex included Chrysophyta (12.5% and 30.7%, respectively; dominant *Dinobryon divergens* 22.5% of  $B_{tot}$ ) and Bacillariophyta (9.9% and 52.5%, respectively; *Tabellaria fenestrata* 26.4% of  $B_{tot}$  dominant, *Aulacoseira granulata* 13% of  $B_{tot}$  dominant) (see Fig. 4).

The dominant complex at station Z\_3 included the following species - *Dinobryon divergens* (32.5% of  $B_{tot}$ ), *Aphanothece clathrata* (28.3% of  $N_{tot}$ ), *Puncticulata bodanica* (20.8% of  $B_{tot}$ ), *Dolichospermum spiroides* (11.7% of  $N_{tot}$ ), *Aphanocapsa elachista* (10.6% of  $N_{tot}$ ) (see Fig. 4). In the southeastern part of the Kizhi skerries area of Lake Onego (station Z\_4), N was dominated by Chlorophyta (25.9%, dominant species: *Coenococcus planctonicus* - 13% of  $N_{tot}$ ) and Cyanobacteria (41.4%, dominant species: *Aphanocapsa elachista* - 13% of  $N_{tot}$ , *Gomphosphaeria lacustris* - 15% of  $N_{tot}$ ). Chrysophyta (21.1% and 42.5%, respectively; dominant *Dinobryon divergens* - 31.5% of  $N_{tot}$ ), and Bacillariophyta (44.6% of B, dominant *Tabellaria fenestrata* - 28.5% of  $N_{tot}$ ) dominated by N and B, respectively. At all survey stations in the Kizhi skerries area in summer 2023, the microalgae divisions Cryptophyta (up to 1.7% of N), Dinophyta (up to 6.4% of B) and Euglenophyta (up to 8.2% of B) were the least developed (see Fig. 4).

In July 2023, the Kizhi Island area was classified as an oligosaprobic zone (water quality class 2, clean) based on calculated S ( $1.52 \pm 0.03$ ) (see Table 4). The  $B_{tot}$  of phytoplankton ranged from  $\alpha$ - $\beta$ -mesotrophy to  $\alpha$ -eutrophy (1.54-6.64 mg/l), and the Chl *a* concentration ranged from oligo- $\alpha$ -mesotrophy (1.1-4.6  $\mu\text{g/l}$ ). The  $N_{tot}$  of microalgae ranged from 1450 to 4983 thousand cells/l (see Table 4). The highest Chlorophyll *a* content in water was observed at station Z\_1, where Chlorophyta (35.5%), one of the most productive microalgae departments, were actively vegetating (see Table 4).

At station Z\_2, where the greatest amount of water transport is concentrated, the phytoplankton biomass reached 6.64 mg/l, including small-cell cyanobacteria (*Aphanocapsa elachista*,  $V_{cells} = 2 \mu\text{m}^3$ ), green algae (species sp. *Crucigenia*, *Oocystis*, *Scenedesmus*, *Pandorina*, *Coenococcus*, *Elakatothrix*, *Koliella*, *Chlamydomonas*,  $V_{cells} = 14$  to  $270 \mu\text{m}^3$ ) and larger algae (e.g. golden algae and diatoms) were observed to be thriving. However, active development of the chrysophyte *Dinobryon divergens* and the diatom *Tabellaria fenestrata* was also observed in spring, but it was in summer that the cell volumes of these two species were six and two times higher, respectively, than in spring, due to the active growth of the cells themselves. The length of the house in the bushy colonies of *Dinobryon divergens* reached 68  $\mu$ , and the width - 13  $\mu$  ( $V_{cells} = 5978 \mu\text{m}^3$ ). Colonies of *Tabellaria fenestrata* were identified, exhibiting a range of sizes, with flap lengths reaching up to 107  $\mu$  and septal heights reaching up to 18.2  $\mu$  (mean  $V_{cells} = 6364 \mu\text{m}^3$ ). In addition, the large diatom *Aulacoseira granulata*, with a flap length and height of 42  $\mu$  and 28  $\mu$ , respectively ( $V_{cells} = 25848 \mu\text{m}^3$ ), was also actively developing.

At station Z\_3, high  $N_{tot}$  (see Table 4) was formed by the cyanobacteria *Aphanothece clath-*

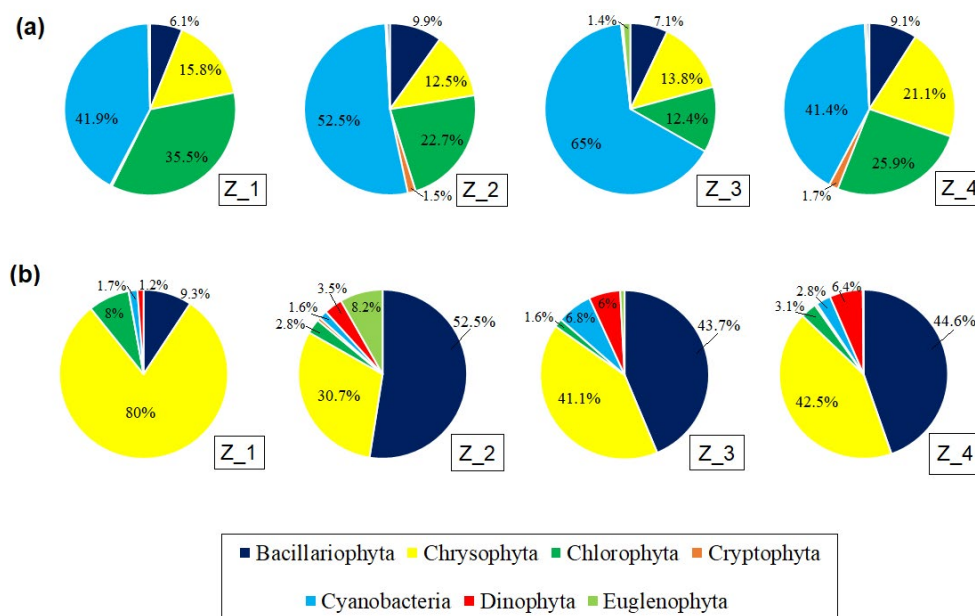


Fig.4. Phytoplankton structure in the area of Kizhi Island, Lake Onego (sampling stations - Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) in July 2023: (a) - by abundance, (b) - by biomass.

**Table 4.** Phytoplankton development indicators and saprobic indices in the Kizhi Island area of Lake Onego (July 2023).

Indicator	Sampling stations			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Quantitative indicators				
$N_{tot}$ , thousand cells/l	1743	4983	2358	1450
$B_{tot}$ , mg/l	1.54	6.64	3.37	2.40
Chlorophyll a				
Chl a, $\mu\text{g/l}$	4.6	3.2	1.1	2.3
Saprobic index				
S	1.46	1.54	1.61	1.47

*rata*, *Aphanocapsa elachista* ( $V_{cells}$  = up to  $3 \mu\text{m}^3$ ) and *Dolichospermum spiroides* ( $V_{cells}$  = up to  $331 \mu\text{m}^3$ ). By contrast,  $B_{tot}$  was formed by the large chrysophyte *Dinobryon divergens* and the centric diatom *Puncticulata bodanica* ( $V_{cells}$  = up to  $21086 \mu\text{m}^3$ ), whose shell diameter reached up to  $50 \mu\text{m}$ .

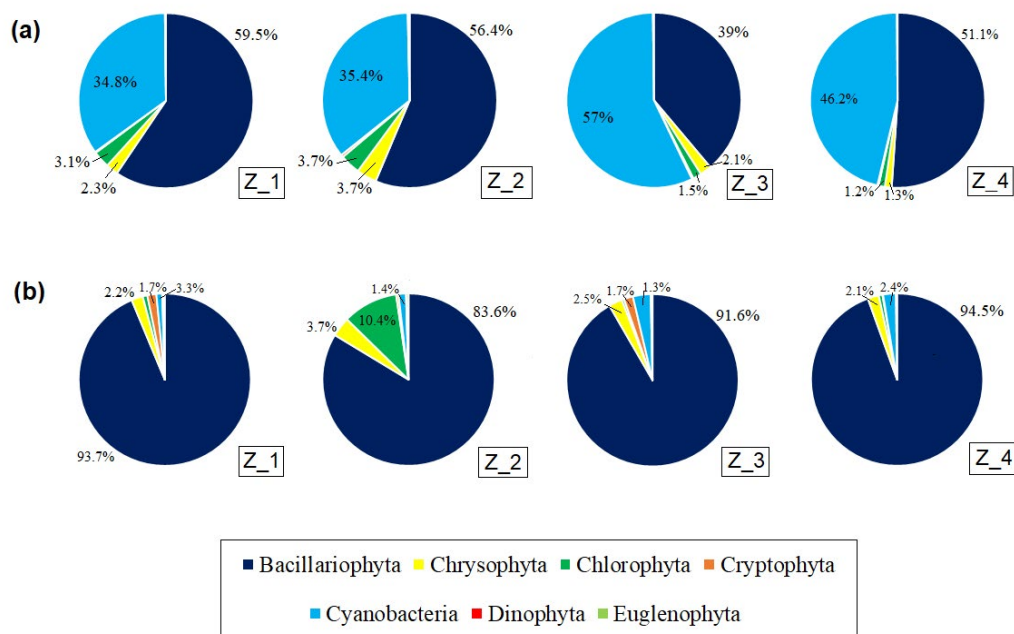
### 3.4. Development of autumn phytoplankton

A survey of the phytoplankton community in the Kizhi skerries area of Lake Onego in September 2023 identified 82 algal species from seven systematic groups: Bacillariophyta - 28 (34.1%); Chlorophyta - 20 (24.4%); Cyanobacteria - 15 (18.3%); Chrysophyta - 13 (15.9%); Euglenophyta - 2 (2.4%); Cryptophyta - 3 (3.7%); Dinophyta - 1 (1.2%).

Diatoms (59.5% by N; 93.7% by B) and cyanobacteria (34.8% by N) dominated the algal flora in the autumn period at station Z\_1. A species representative of the diatom algae, *Fragilaria crotonensis*, which

is predominantly part of the summer phytoplankton complex, was the absolute dominant species in terms of both abundance (54%) and biomass (74.4%). Among cyanobacteria, *Aphanothece clathrate* (11% of  $N_{tot}$ ) was dominant (Fig. 5). At station Z\_2 in autumn diatoms (56.4%) and cyanobacteria (35.4%) dominated by N, among them *Fragilaria crotonensis* (46% of  $B_{tot}$ ), *Aphanocapsa inserta* (15.5% of  $N_{tot}$ ). By B, diatoms dominated up to 83.6% (*F. crotonensis* - 57% of  $B_{tot}$ ). Abundance of greens (10.4%) was observed due to the development of *Coelosphaerium kuetzingianum* (10% of  $B_{tot}$ ) (see Fig. 5).

In the northeastern area of the skerries (station Z\_3), cyanobacteria (57%) and diatoms (39%) dominated N, diatoms (91.6%) dominated B. The dominant complex was represented by *Fragilaria crotonensis* (23% of  $N_{tot}$ ; 40% of  $B_{tot}$ ), *Tabellaria fenestrata* (4.2% of  $N_{tot}$ ; 17.7% of  $B_{tot}$ ), *Gomphosphaeria lacustris* f. *compacta* (20.7% of  $N_{tot}$ ), *Aphanothece clathrata* (16.1% of  $N_{tot}$ ), *Oscillatoria limosa* (14.8% of  $N_{tot}$ ) (see Fig. 5). In the southeastern part of the Kizhi skerries area of Lake Onego (station Z\_4), diatom algae were dominant by

**Fig.5.** Phytoplankton structure in the area of Kizhi Island, Lake Onego (sampling stations - Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) in September 2023: (a) - by abundance, (b) - by biomass.

N and B in autumn (51.1% and 94.5%, respectively) due to active development of *Fragilaria crotonensis* (42% of  $N_{tot}$ , 64% of  $B_{tot}$ ), and cyanobacteria (up to 46.2%) mainly due to development of *Aphanothece clathrata* (15% of  $N_{tot}$ ), *Oscillatoria limosa* (14% of  $N_{tot}$ ). Cryptophyta (up to 1.7% by N), Dinophyta (up to 0.4% by B) and Euglenophyta (up to 0.3% by B) were found in the Kizhi skerries area of Lake Onego in September 2023 in the lowest numbers (see Fig. 5).

A study of the microalgae in the area of Kizhi Island in September 2023 revealed that the S value was higher ( $2.1 \pm 0.14$ ) than in the spring and autumn periods. This is likely to be due to a higher quantitative development of  $\beta$ -mesosaprobic species such as *Fragilaria crotonensis*, *Aphanothece clathrate*, *Oscillatoria tenuis*, *Snowella lacustris* and *Aphanocapsa inserta*. The results obtained from this study characterised the area in question as a  $\beta$ -mesosaprobic zone with water quality class 3 (satisfactorily clean) (see Table 5 for details).

In September 2023, the  $B_{tot}$  of microalgae in the study area ranged from  $\alpha$ - $\beta$ -mesotrophy to  $\alpha$ -eutrophy (2.86 to 4.92 mg/l), Chl a concentration (5.8-7.5  $\mu$ g/l) ranged from  $\alpha$ - $\beta$ -mesotrophy, and  $B_{tot}$  ranged from 4285 to 8645 thousand cells/l (see Table 5). The highest concentration of Chl a was observed at station Z\_2 and Z\_3, on the background of active development of diatom algae and cyanobacteria, productive species of green algae (up to 10.4%) were also vegetating. The highest biomass was observed at station Z\_4, where the greatest contribution was made by diatom algae (94.5%), namely diatom with numerous colonies - *Fragilaria crotonensis* ( $V_{cells} = 873 \mu m^3$ ), and small celled cyanobacteria *Aphanothece clathrata* and *Oscillatoria limosa* ( $V_{cells} = 50.2 \mu m^3$ ).

#### 4. Discussion

One of the important factors determining phytoplankton development is water temperature (Reynolds, 2006; Winder and Sommer, 2012). During the study period in the Kizhi skerries area of Lake Onego, the surface layer temperature was within the range of multiyear variability:  $14.9 \pm 0.41^\circ C$  (May 2023) to  $10.5-19.9^\circ C$  (1994-2020);  $18.1 \pm 0.24^\circ C$  (July 2023) to  $17.2-20.8^\circ C$  (1996-2021);  $14.5 \pm 0.05^\circ C$  (September 2023) to  $9.8-14.2^\circ C$  (2004-2008).

The quantitative and qualitative development of phytoplankton is closely related to the chemical composition of waters, especially the nutrient concentrations (Reynolds, 2006). The concentrations of P, N, Si were similar at all stations in the Kizhi Island area. The total phosphorus concentration in the area of Lake Onego was averaged 9  $\mu$ g/l, classifying water as oligotrophic according to the established geochemical classification criteria. It is noteworthy that the same TP concentration was found in this lake area during the 2019-2020 period (Galakhina et al., 2022), suggesting the stability of the ecological environment in this region over recent years. Concentrations of TP were increased from spring to summer and autumn, which was caused by an increase in the organic form of phosphorus while the mineral form remained constant. Uncontaminated water bodies in Karelia are characterized by a high proportion of organic phosphorus in the TP composition, which is associated with natural compounds of both autochthonous and allochthonous origin (Ryzhakov et al., 2016). The concentrations of nitrogen forms varied insignificantly between all stations of the Kizhi skerries.  $N_{org}$  was identified as the predominant form of total nitrogen, accounting for more than 50% of the total, while the content of mineral forms was considerably lower. Thenitrate concentrations were decreased from spring (0.03-0.08 mgN/l) to autumn (0.00-0.02 mgN/l) in the studied area of the lake, up to their complete absence at some stations. This was caused by the active consumption of  $NO_3^-$  by littoral zone phytoplankton (Sabylina and Ryzhakov, 2018). Furthermore, it has been observed that the maximum  $NH_4^+$  concentrations were determined during the summer (with an average of 0.05 mgN/l).

Silicon plays an important physiological role and is involved in the metabolism of diatom cells (Martin-Jézéquel et al., 2000). During the study period, the concentrations of this element were varied from 0.25 to 0.53 mgSi/l in the Kizhi Island. The differences were associated with the seasonal dynamics of this element. The concentrations of Si were decreased from spring to autumn because of the intensive diatom plankton production, as silicon is involved in the construction of its cell wall (Martin-Jézéquel et al., 2000; Ryzhakov et al., 2019).

**Table 5.** Phytoplankton development indicators and saprobic indices in the Kizhi Island area of Lake Onego (September 2023).

Indicator	Sampling stations			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Quantitative indicators				
$N_{tot}$ , thousand cells/l	5305	4285	6712	8645
$B_{tot}$ , mg/l	3.42	2.86	3.33	4.92
Chlorophyll a				
Chl a, $\mu$ g/l	5.8	7.5	7.5	6.7
Saprobic index				
S	2.42	2.3	1.81	1.95

One of the important criteria for phytoplankton development is the ratio of TN/TP. It is widely accepted that, for optimal phytoplankton proliferation, the prevailing N/P ratio in aquatic ecosystems should be 16N:1P (Redfield, 1934). At the time of the study in the Kizhi Island area of Lake Onego the TN/TP ratio varied from 240/10 to 320/4 (in mg/l), which indicates that phosphorus is the limiting factor for phytoplankton development in the study area. For diatoms, phosphorus is of minor importance, and these algae can develop at very low concentrations of phosphorus, unlike cyanobacteria, for which the presence of phosphorus in water plays an important role. However, total phosphorus concentrations were found to be low in the Kizhi Island area during the study period. It is plausible that the ratio of TN to TP may have exerted a significant influence on the pronounced development of cyanobacteria. It has been established that a lower ratio of these two elements ( $TN/TP \leq 29/1$ ) results in a greater prevalence of cyanobacteria within the phytoplankton community (Smith, 1983; Havens et al., 2003; Graham et al., 2004; Harris et al., 2016). Consequently, in 2023, the study area exhibited an increase in cyanobacteria abundance from spring to autumn (from 736 to 3990 thousand cells/l) accompanied by a decrease in the TN/TP ratio from 310 (May) to 15.9 (September).

The phytoplankton species composition during the study period remained consistent in general, exhibiting characteristics typical of Lake Onego (Vislyanskaya et al., 1999; Chekryzheva, 2012; Smirnova, 2025). The phytoplankton community in the area of the Kizhi skerries of Lake Onego is formed by typical representatives of diatoms, green and golden algae and cyanobacteria. The predominant diatom group in terms of species diversity is represented by the classes Centrophyceae and Pennatophyceae, which are characteristic of most water bodies in the Arctic and Subarctic regions (Komulainen et al., 2006; Getsen, 1985).

According to the results of early observations (1967-2010) of the study area, diatom algae were observed to be vegetating in spring, while golden algae (species of the genus *Dinobryon*) were noted to be growing in early summer, and small celled species of the genus Chlorococcales and golden algae were found to be intensively developing in summer (Petrova, 1975; Chekryzheva and Vislyanskaya, 2000; Chekryzheva, 2008). Cyanobacteria, including *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*, *Woronichinia*, and *Coelosphaerium*, have also been found to be extensively developed within the composition of autumn phytoplankton, particularly in the presence of diatoms (primarily *A. islandica*) (Chekryzheva and Vislyanskaya, 2000).

However, due to the elevated water surface temperature in May 2023 (reaching up to 15.8°C), the algal community comprised not only species of the spring complex (dominant: *Aulacoseira islandica*) of diatom algae, but also species of the summer complex (dominant: *Tabellaria fenestrata*). Furthermore, cyanobacteria, green and golden algae, which are more characteristic of the summer period of phytoplankton development, were observed to be actively developing in spring. At the time of the study, the Kizhi Island area of Lake Onego exhibited low quantitative microalgae parame-

ters (see Table 2). Previously (1994-2005), in the spring period,  $B_{tot}$  ranged from 1.10 to 2.50 mg/l and  $N_{tot}$  varied from 730 to 1,320 thousand cells/l (Vislyanskaya et al., 1999; Syarki et al., 2015). It is probable that the maximum development of spring phytoplankton in 2023 occurred in early to mid-May and was not observed in our seasonal observations.

The phytocenosis of the Kizhi skerries area during the summer period of 2023 is characterised by a high level of phytoplankton development, which is evident in the highest recorded species richness (see Table 3). The current quantitative microalgae indices obtained ( $N_{tot}$ :  $2633.8 \pm 805.68$  thousand cells/l;  $B_{tot}$ :  $3.49 \pm 1.11$  mg/l) fall outside the confidence interval when compared to earlier observations ( $N_{tot}$ :  $1016.1 \pm 437.98$  thousand cells/l;  $B_{tot}$ :  $0.73 \pm 0.24$  mg/l). Recent years have seen an increase in both the total abundance and total biomass of summer phytoplankton, with this increase being primarily attributable to an increase in small-celled cyanobacterial species. Consequently, the mean abundance and biomass of cyanobacteria in summer were found to be  $456.4 \pm 417.8$  thousand cells/l and  $0.016 \pm 0.01$  mg/l, respectively. In contrast, in 2023, these values increased to  $1370.1 \pm 463.84$  thousand cells/l and  $0.108 \pm 0.04$  mg/l, respectively. Despite the fact that the water temperature is within the limits of multiyear variability and total phosphorus values are at the level of oligotrophy, it is possible that the development of summer phytoplankton is influenced by a complex of various factors, including well-warmed shallow water with a water surface temperature of up to 21°C, weak dynamics of water masses, and low values of the TN/TP ratio, which allow cyanobacteria to develop actively. Further research is required to identify more precise reasons for the increase of microalgae in recent years.

The phytoplankton community of the Kizhi Island area is characterised by an autumn peak in phytoplankton development, formed not only by diatom algae (as for the main water area of Lake Onego), but also by cyanobacteria (Chekryzheva and Vislyanskaya, 2000), which was observed in September 2023. In the context of diatom algae, the heat-loving species *Fragilaria crotonensis*, a characteristic constituent of the summer phytoplankton community in Lake Onego, undergoes active development during the autumn months (Chekryzheva, 2008; 2012; Trifonova, 1990). This phenomenon is concomitant with elevated water surface temperatures, which can reach a maximum of 14.6°C. The elevated quantitative values exhibited a marked deviation from the earlier observations of autumn phytoplankton condition in 1994 ( $B_{tot}$  0.70-2.00 mg/l;  $N_{tot}$  350-590 thousand cells/l). It is imperative to acknowledge that this observation was recorded in mid-October, a period characterised by the decline in phytoplankton development and the onset of winter conditions.

Concentrations of chlorophyll *a* in the water increased from spring to autumn, possibly due to an increase in small celled, more productive forms of algae (Gutelmacher, 1986), as well as medium productive diatoms, whose abundance varied from 482,000 cells/l (May) to 4415,000 cells/l (September).



## 5. Conclusions

A high species diversity of microalgae was observed in all seasons of observations in the area of Kizhi Island of Lake Onego in 2023. The most significant developments were observed in the spring and autumn, with diatoms and cyanobacteria displaying marked proliferation. In the summer months, cyanobacteria, green algae and golden algae were particularly prevalent. A decline in silicon concentration from spring to autumn was observed, which is associated with the active increase of diatom algae. Furthermore, a decrease in the ratio TN/TP was noted, which can be applied as indicator of active production of cyanobacteria. As demonstrated by the quantitative indicators of phytoplankton, chlorophyll *a* concentration and saprobic indexes, in 2023 the Kizhi Island area of Lake Onego was classified as a mesotrophic area of the lake ( $\beta$ -mesosaprobic zone, with water quality class 3), as had previously been the case.

The obtained data are generally comparable with the results of previous studies. However, a notable exception is observed in the heightened development of phytoplankton during the summer months. The potential rationale for this phenomenon could be attributed to enhanced heating of the surface water layer, along with an elevated ratio of biogenic elements.

It is evident that the unique natural environment of the Kizhi skerries, marked by enhanced thermal stratification, reduced water exchange with the open lake, and the presence of anthropogenic influences, fosters a more vigorous proliferation of phytoplankton. This phenomenon stands in contrast to the deep-water regions of the reservoir. An escalation in anthropogenic activity and a rise in global temperatures could precipitate more pronounced alterations in the phytocenosis of the Lake Onego area under scrutiny.

## 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 Investment Fund of the Republic of Karelia (VIF RK).

## Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

## References

Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice. 2017. In: Lozovik P.A., Efremenko N.A. (Eds.). Saint Petersburg: Nestor-Istoriya. (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., Vislyanskaya I.G. 2000. Phytoplankton. Inventory and study of biological diversity in the territory of the Zaonezhsky Peninsula and northern Priladozhye. In:

Operational information materials. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 167–175. (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: Karelian National Research Center RAS, 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)

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)

Efremova T.V., Palshin N.I. 2015. Long-term variability of water temperature and ice phenology. The largest lakes-reservoirs of the North-West of European Russia: current state and changes in ecosystems under climatic and anthropogenic impacts. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, pp. 38–44. (in Russian)

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

Filatov N.N., Baklagin V.N., Bogdanova M.S. et al. 2020. Diagnosis and forecast of thermohydrodynamics and ecosystems of the great lakes of Russia. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (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 and Management* 17: 1–14.

Getsen M.V. 1985. Algae in ecosystems of the Far North. Leningrad: Science. (in Russian)

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)

GOST 17.1.4.02–90. 1990. USSR State Committee for Nature Protection. Water. Methodology for spectrophotometric determination of chlorophyll *a*. Moscow: Izdatel'stvo standartov. (in Russian)

Graham J.L., Jones J.R., Jones S.B. et al. 2004. Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States. *Water research* 38: 4395–4404.

Gutelmacher B.L. 1986. Metabolism of plankton as a whole: Trophometabolic interactions of zoo- and phytoplankton. Leningrad: Science. (in Russian)

Harris T.D., Smith V.H., Graham J.L. et al. 2016. Combined effects of nitrogen to phosphorus and nitrate to ammonia ratios on cyanobacterial metabolite concentrations in eutrophic Midwestern USA reservoirs. *Inland Waters* 6(2): 199–210.

Havens K.E., James R.T., East T.L. et al. 2003. N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental pollution* 122(3): 379–390.

Ivanter E.V., Korosov A.V. 2010. Elementary biometrics: a tutorial. Petrozavodsk: Publishing house of PetrSU. (in Russian)

- 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: Karelian National Research Center RAS, pp. 108–112. (in Russian)
- Khokhlova T.Y., Semina O.V. 1988. Nature of the Kizhi Skerries. Petrozavodsk: Karelia. (in Russian)
- Kiselev I.A. 1954. Pyruvitic algae. Identifier of freshwater algae of the USSR. Issue 6. Moscow: Soviet Science. (in Russian)
- Kitaev S.P. 2007. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (in Russian)
- Komárek J., Anagnostidis K. 1998. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (1). Cyanoprokaryota: Chroococcales. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag.
- Komárek J., Anagnostidis K. 2005. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (2). Cyanoprokaryota: Oscillatoriales. Heidelberg: Elsevier, Spektrum.
- Komárek J. 2013. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (3). Cyanoprokaryota: Heterocytous. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Komulainen S.F., Chekryzheva T.A., Vislyanskaya I.G. 2006. Algal flora of lakes and rivers of Karelia. Taxonomic composition and ecology. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (1). Bacillariophyceae: Naviculaceae. Stuttgart-Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (3). Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag.
- Lakes of Karelia. Reference book. 2013. In: Filatov N.N., Kukharev V.I. (Eds.). Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS. (in Russian)
- Lozovik P.A. 2013. Geochemical classification of surface waters of the humid zone based on their acid-base balance. *Vodnye resursy* [Water Resources] 40(6): 583–593. (in Russian)
- 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: Science. (in Russian)
- Martin-Jézéquel V., Hildebrand M., Brzezinski M.A. 2000. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *Journal of phycology* 36(5): 821–840.
- Matvienko A.M. 1954. Golden algae. Definitel of freshwater algae of the USSR. Issue 3. Moscow: Soviet Science. (in Russian)
- Methods of hydrobiological studies of inland waters. 2024. In: Krylov A.V. (Ed.). Borok: IBVV RAS. (in Russian)
- Oksiyuk O.P., Zhukinsky V.N.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)
- Onego Lake. Atlas. 2010. In: Filatov N.N. (Ed.). Petrozavodsk: KarSC RAS.
- Petrova N.A. 1971. Phytoplankton of Lake Onego. Flora of Lake Onego. Leningrad: Science, pp. 88–121. (in Russian)
- Petrova N.A. 1975. Phytoplankton of the littoral zone of Lake Onego. Littoral zone of Lake Onego. Leningrad: Science, pp. 138–145. (in Russian)
- PND F 14.1:2:3:4.279-14. 2014. Methodology for determination of organic carbon and total nitrogen in drinking, natural and waste waters by high-temperature oxidation using carbon and nitrogen analyzers. (in Russian)
- Protasov Yu.G. 1999. Some topical issues of anthropogenic impact on the territory of the protection zone of the museum-reserve 'Kizhi'. *Trudy` Karel`skogo nauchnogo centra RAN. Ser. «Biogeografiya Karelii»* [Proceedings of the Karelian Scientific Centre of the RAS. Ser. 'Biogeography of Karelia] 1: 126–131. (in Russian)
- Redfield A.C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *James Johnstone memorial volume 1*: 176–192.
- Reynolds C.S. 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ryzhakov A.V., Zobkova M.V., Lozovik P.A. 2016. Features of the content and distribution of phosphorus forms in water bodies of the humid zone. *Trudy Karel`skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 9: 33–45. (in Russian)
- Ryzhakov A.V., Vapirov V.V., Stepanova I.A. 2019. Silicon in surface waters of the humid zone (on the example of water bodies of Karelia). *Trudy Karel`skogo nauchnogo centra RAN* [Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 3: 52–60. (in Russian)
- Sabylina A.V. 1999. Current hydrochemical regime of the lake. In: Filatov N.N. (Ed.), Onego Lake. Ecological problems. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS, pp. 58–99. (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. (Eds.), State of water bodies of the Republic of Karelia according to the results of monitoring in 1998-2006. Petrozavodsk: Karelian National Research Center RAS, pp. 29–40. (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. 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: Karelian National Research Center RAS, pp. 75-78. (in Russian)
- Sabylina A.V., Ryzhakov A.V. 2018. Hydrochemical characteristics of the littoral zone of Lake Onega. *Vodnye resursy* [Water Resources] 45(2): 179–187. (in Russian)
- Sladeczek V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *ArchivfürHydrobiologie. BeiheftErgebnisse der Limnologie* 7: 1–128.
- Smirnova V.S. 2025. Trophic state of the Kizhi skerries area of Lake Onego and water quality assessment based on summer phytoplankton indicators. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 30–51. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-30
- Smith V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* 221: 669–671.
- 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)
- Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas. SuomenLuonnonsuojelunTuki Oy. Helsinki: Forssa.*



Trifonova I.S. 1990. Ecology and succession of lake phytoplankton. Leningrad: Science. (in Russian)

Wasser 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. Current state of hydrobiocenoses of the Kizhi skerries area of Lake Onego. *Trudy` Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya B. «Biogeografiya Karelii»* [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: Soviet science. (in Russian)

# Структура и сезонная динамика фитопланктона района о. Киж Онежского озера

Оригинальная статья  
LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Смирнова В.С., Сластина Ю.Л.\* , Зобкова М.В.

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

**АННОТАЦИЯ.** В результате исследования состояния фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера весной, летом и осенью 2023 года был обнаружен высокий уровень развития микроводорослей. В целом количественные показатели фитоценоза характеризуют данный район Онежского озера как мезотрофный. На основе индикаторных значений фитопланктона, обнаруженных в период исследования, и их количественного развития, тип вод в районе Кижских шхер Онежского озера можно отнести к  $\beta$ -мезосапробной зоне загрязнения с 3 классом качества воды, удовлетворительно-чистая. Наибольшее количественное развитие выявлено в весенний и осенний периоды – диатомовых и цианобактерий, летом – цианобактерий, золотистых и зеленых водорослей. Кроме того, от весны к осени установлено снижение концентрации кремния, что связано с увеличением диатомовых водорослей, а также уменьшение соотношения общего азота к общему фосфору, что возможно повлияло на активное развитие цианобактерий. Интенсивная вегетация фитопланктона района о. Киж связана с природными условиями этого района.

**Ключевые слова:** фитопланктон, сезонная динамика, биогенные элементы, трофический статус, качество воды, Онежское озеро

Для цитирования: Смирнова В.С., Сластина Ю.Л., Зобкова М.В. Структура и сезонная динамика фитопланктона района о. Киж Онежского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 729-760. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-729

## 1. Введение

В северо-западной части Онежского озера в Республике Карелия располагается система островов, отличающаяся уникальным геологическим строением от всех других районов озера (Голубев, 1999; Дейнес, 2013). Кижский архипелаг относится к особо охраняемым территориям, где сформировались условия для развития наземных и водных биоценозов (Хохлова и Семина, 1988; Капитонова, 2008).

Сообщество фитопланктона в районе Кижских шхер в 60-70-е гг. прошлого столетия отличалось от таковых в других районах Онежского озера более высокими показателями развития из-за сформировавшихся особых ландшафтных условий на данной территории, таких как – быстро прогреваемое мелководье, замедленный водообмен и сравнительная изолированность от озера (Вислянская и др., 1999; Чекрыжева, 2008; Петрова, 1971). Поэтому весной здесь отмечается более ранний прогрев водной массы и ее интенсивное переме-

шивание в результате отделения термобаром шхер от основной акватории озера и установления прямой термической стратификации с более высокими температурами поверхности воды для Онежского озера (Петрова, 1971). Таким образом, сезонные фазы развития фитопланктона на данной акватории могут наступить раньше, по сравнению с глубокowodными районами озера (Петрова, 1971). Но, несмотря на вышеперечисленные условия, развитие микроводорослей в ранний период исследования (60-70-е гг.) соответствовало олиготрофному уровню (Чекрыжева, 2008).

Однако, в 1990 г. Архитектурный ансамбль Кижского погоста, который находится на одном из самых крупных островов Кижского архипелага – о. Киж, был включен в Список объектов всемирного культурного наследия ЮНЕСКО (Онежское озеро. Атлас, 2010). Именно в это время район о. Киж Онежского озера начал подвергаться значительной антропогенной нагрузке за счет увеличения количества хозяйственно-бытовых сточных вод (концентрация общего фосфора до 25 мкг/л) (Galakhina

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [jls@inbox.ru](mailto:jls@inbox.ru) (Ю.Л. Сластина)

Поступила: 11 февраля 2025; Принята: 12 августа 2025;  
Опубликована online: 31 августа 2025

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



et al., 2022) и воздействия водного транспорта (количество нефтепродуктов в воде от 0.15 до 0.6 мг/л) (Сабылина, 1999; Протасов, 1999; Сабылина и Рыжаков, 2007; Сабылина и др., 2012; Galakhina et al., 2022). В результате увеличения антропогенной нагрузки на данной территории в 90-е гг. в фитоценозе района Кижских шхер Онежского озера были отмечены изменения структуры и количественного уровня развития водорослей, что привело к увеличению трофического статуса от олиготрофного до мезотрофного (Вислянская и др., 1999). Такой уровень развития фитопланктона сохранился и в 2000-е годы (Чекрыжева и Вислянская, 2000; Чекрыжева, 2008).

В настоящее время из-за увеличения температуры воздуха возросла продолжительность периода открытой воды, а также увеличилась средняя температура поверхности воды Онежского озера (Филатов и др., 2020; Ефремова и Пальшин, 2015). В связи с климатическими изменениями, влияющими на температурный режим всей акватории Онежского озера и антропогенным воздействием непосредственно на район Кижских шхер – целью настоящего исследования является охарактеризовать современную структуру фитопланктона, изучить его количественное развитие в разные сезоны года, а также на основе индикаторных значений видов микроводорослей дать оценку качества воды изучаемого района.

## 2. Материалы и методы исследования

Остров Кижь находится в северной части Онежского озера (61°42' с.ш., 35°25' в.д.) – второго по величине пресноводного водоема в Европе. Озеро относится к бассейну Балтийского моря с площадью зеркала – 9720 км<sup>2</sup>, его средняя глубина составляет 30 м, максимальная – 120 м, период условного водообмена – 15.6 лет. Озерные воды относятся к мезогумусным, слабощелочным водам гидрокарбонатного класса группы Са (Озера Карелии, 2013).

Для качественной и количественной оценки состояния фитопланктона, а также содержания биогенных элементов в районе о. Кижь Онежского озера были отобраны пробы воды в мае (29.05), июле (31.07) и в сентябре (23.09) 2023 года в поверхностном слое (0.5 м) на станциях Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4 (Рис. 1).

Пробы воды (V=0.5 л) были отобраны батометром Руттнера и зафиксированы 10 мл 40%-ого формалина. Концентрирование проб воды для анализа микроводорослей проводилось на мембранных фильтрах ( $D_{пор} = 0.8$  мкм) до объема 5 мл (Методы гидробиологических..., 2024; Федоров, 1979). Расчет численности ( $N_{tot}$ ) и определение фитопланктона проводилось с помощью микроскопа Микмед-6. Для идентификации видового состава альгофлоры использовали следующие определители (Забелина и др., 1951; Матвиенко, 1954; Киселев, 1954; Tikkanen, 1986; Komárek, 1998; 2005; 2013; Krammer and Lange-Bertalot, 1986; 1991). Биомассу микроводорослей ( $V_{общ}$ ) рассчитывали стереометрическим методом, вычисляя объем каждой клетки. К категории доминирующих видов относили виды с численностью и/или биомассой более 10%, к субдоминантам – более 5%.

Индикаторную значимость видов фитопланктона описывали по следующим материалам (Sladecsek, 1973; Макрушин, 1974; Вассер и др., 1989; Барина и др., 2006). Индекс сапробности (S) воды рассчитывали по методу Пантле-Бука в модификации Сладечека (Sladecsek, 1973), зону сапробности определяли по (Оксиюк и др., 1993). Для выполнения статистического анализа состояния фитопланктона района Кижских шхер Онежского озера отсутствуют регулярные ряды данных о фитопланктоне этого района ( $n < 5$ ), за исключением летних наблюдений ( $n = 14$ ). Полученные количественные показатели в 2023 году сравнивали с зарегистрированными данными фитопланктона (Сярки и др., 2015), полученными в период с 1996 по 2010 гг., используя доверительный интервал (Ивантер и Коросов, 2010).

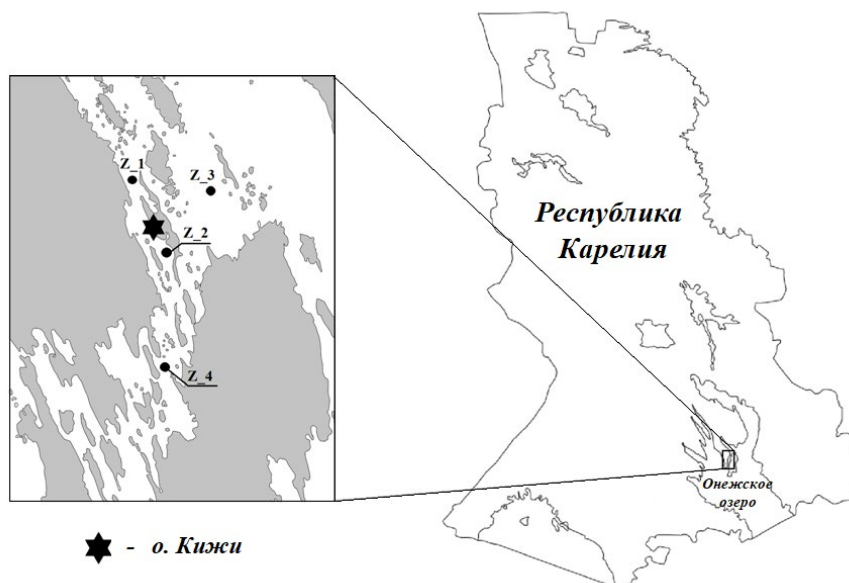


Рис.1. Карта-схема места отбора проб для анализа фитопланктона и содержания биогенных элементов в районе Кижских шхер Онежского озера.

Концентрации хлорофилла *a* (Хл *a*) в воде измеряли стандартным спектрофотометрическим методом (ГОСТ 17.1.4.02–90). Биогенные элементы ( $P_{\text{мин}}$ ,  $P_{\text{общ}}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ , Si) в пробах воды исследованных станций определяли по стандартным методикам (Аналитические..., 2017). Определение общего азота ( $N_{\text{общ}}$ ) осуществляли высокотемпературным окислением на анализаторе Shimadzu TOC-LCSN по методике (ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14), а органического азота ( $N_{\text{орг}}$ ) – по разности  $N_{\text{общ}}$  и минеральных форм.

Температуру поверхности воды в период исследования измеряли прибором CastAway-CTD. Для сравнения температуры поверхностного слоя воды в исследованном районе с ранними наблюдениями была использована зарегистрированная база данных (Калинкина и др., 2023).

Трофическое состояние района о. Кижь Онежского озера в 2023 году по биомассе фитопланктона и концентрации хлорофилла *a* было оценено по классификациям типов озер, представленных в работе С.П. Китаева (2007), по содержанию общего фосфора в воде – по Лозовику П.А. (2013).

### 3. Результаты

В период исследования в составе фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера было идентифицировано 204 таксона рангом ниже рода, принадлежащих к 7 систематическим отделам: Bacillariophyta – 76 (37.2%); Chlorophyta – 54

(26.5%); Cyanobacteria – 33 (16.2%); Chrysophyta – 26 (12.7%); Euglenophyta – 5 (2.5%); Cryptophyta – 6 (2.9%); Dinophyta – 4 (2%) (Таблица 1).

#### 3.1. Температуры поверхности воды и содержание биогенных элементов в водах период исследования

В мае 2023 года в районе Кижских шхер Онежского озера температура поверхностного слоя воды варьировала от 14.2 до 15.8°C, в июле – изменялась от 17.4 до 18.5°C, в сентябре – от 14.4 до 14.6°C (Рис. 2).

Содержание биогенных элементов (P, N, Si) в воде в исследуемом районе в 2023 году было невысоким (Таблица 2). В весенний и летний периоды концентрация  $P_{\text{общ}}$  (1-12 мкг/л) соответствовала олиготрофному статусу. В сентябре концентрация  $P_{\text{общ}}$  (0-17 мкг/л) достигало олиго-мезотрофии. Содержание азотных форм на всех станциях в 2023 года было достаточно близким. В составе  $N_{\text{общ}}$  в период исследования наибольшую долю занимал  $N_{\text{орг}}$ : в мае – от 67.7 до 84%; в июле – от 67.7 до 76%; в сентябре – от 85.2 до 96.3% (см. Таблица 2).

Летом на всех станциях отмечено уменьшение содержания нитратов и увеличение – аммония по сравнению с весенним сезоном. К осени содержание минеральных форм азота снижалось до минимальных значений. Концентрация кремния уменьшалась от весны к осени (см. Таблица 2).

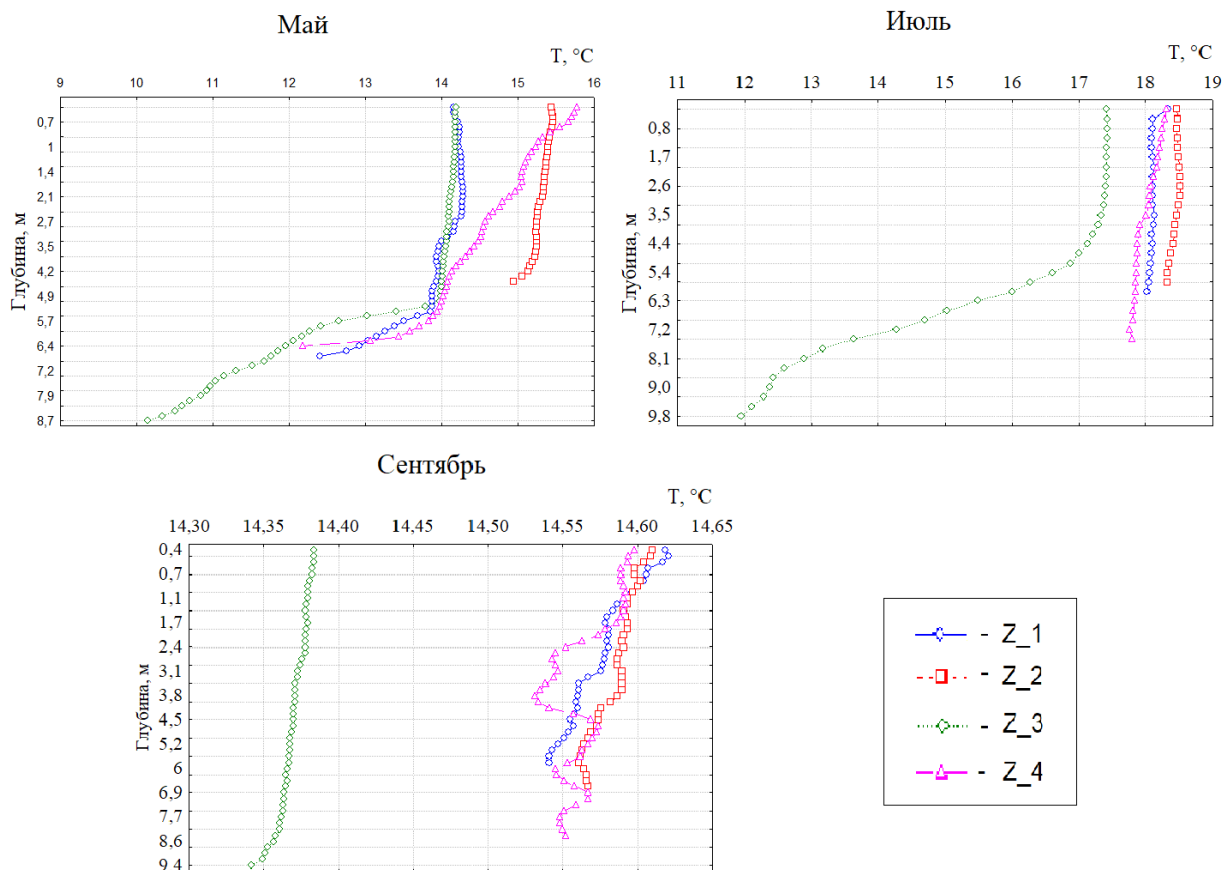


Рис.2. Температура поверхностного слоя воды исследованного района о. Кижь Онежского озера в мае, июле и в сентябре 2023 года.

Таблица 1. Список видов фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера в разные сезоны 2023 года

№	Видовой состав	Сезоны года		
		Весна	Лето	Осень
Cyanobacteria				
1	<i>Synechocystis aquatilis</i> Sauv.	+	+	-
2	<i>Merismopedia punctata</i> Meyen (= <i>Merismopedia tranquilla</i> (Ehr.) Trev.)	DN	+	+
3	<i>Aphanocapsa elachista</i> var. <i>elachista</i> W. et G. S. West	DN	DN	-
4	<i>Aphanocapsa incerta</i> (Lemm.) Cronb. et Kom.	DN	-	DN
5	<i>Aphanocapsa delicatissima</i> W. et G. S. West	-	-	+
6	<i>Aphanothece clathrata</i> f. <i>clathrata</i> W. et G.S. West	-	DN	DN
7	<i>Aphanothece clathrata</i> var. <i>brevis</i> (Bachm.) Elenk.	-	+	-
8	<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i> Näg.	-	-	+
9	<i>Gloeocapsa limnetica</i> (Lemm.) Hollerb. (= <i>Croococcus limneticus</i> Lemm.)	+	DN	+
10	<i>Gloeocapsa magma</i> (Bréb.) Kütz. em. Hollerb.	-	+	-
11	<i>Gloeocapsa minima</i> ampl. f. <i>minima</i> (Keissl.) Hollerb.	-	+	-
12	<i>Gloeocapsa minor</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Croococcus minor</i> (Kütz.) Näg.)	-	+	-
13	<i>Gloeocapsa minor</i> f. <i>dispersa</i> (Keis.) Hollerb.	-	+	+
14	<i>Gloeocapsa montana</i> f. <i>montana</i> (Kütz.) Hollerb.	-	+	-
15	<i>Gloeocapsa punctata</i> Näg. em. Hollerb.	-	+	-
16	<i>Gloeocapsa turgida</i> (Kütz.) Hollerb. (= <i>Chroococcus turgidus</i> (Kütz.) Näg.)	-	+	-
17	<i>Gloeocapsa vacuolata</i> (Skuja) Hollerb.	-	+	-
18	<i>Gloeocapsa varia</i> (A. Br.) Hollerb. (= <i>Chroococcus varius</i> A. Br.)	-	+	-
19	<i>Gomposphaeria lacustris</i> Chod. (= <i>Snowella lacustris</i> (Chod.) Kom. et Hind.)	-	DN	SDN
20	<i>Gomposphaeria lacustris</i> f. <i>compacta</i> Lemm.	-	-	DN
21	<i>Gomposphaeria aponina</i> Kütz.	-	+	-
22	<i>Snowella litoralis</i> (Häyrén) Kom. et Hind.	+	-	-
23	<i>Woronichinia naegeliana</i> (Ung.) Elenk.	-	+	-
24	<i>Oscillatoria planctonica</i> Wolosz. (= <i>Limnothrix planctonica</i> (Wolosz.) Meff.)	+	+	-
25	<i>Oscillatoria agardhii</i> Gom. (= <i>Planktothrix agardhii</i> (Gom.) Anagn. et Kom.)	-	+	-
26	<i>Oscillatoria tenuis</i> Ag. ex Gom. (= <i>Phormidium konstantinosum</i> (Ag.) Umezaki et Watanabe)	SDB	-	+
27	<i>Oscillatoria limosa</i> Ag. et Gom.	-	-	DN
28	<i>Phormidium mucicola</i> Naum. et Hub.-Pestal.	-	+	-
29	<i>Dolichospermum spiroides</i> (Kleb.) Wack. et al.	+	DN	+
30	<i>Dolichospermum flos-aquae</i> (Born. et Flah.) Wack. et al.	-	+	-
31	<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Rich.) Wack. et al.	+	-	+
32	<i>Microcystis aeruginosa</i> (Kütz.) Kütz.	-	+	+
33	<i>Microcystis delicatissima</i> (W. et G. S. West) Starm.	-	-	+
Cryptophyta				
34	<i>Rhodomonas lacustris</i> Pasch. et Rut.	+	+	+
35	<i>Chroomonas acuta</i> Uterm.	-	+	-
36	<i>Chroomonas brevicilcata</i> Näg.	-	+	-
37	<i>Cryptomonas erosa</i> Ehr.	+	+	+
38	<i>Cryptomonas woloszynskae</i> Czosn.	-	+	-
39	<i>Cryptomonas ovata</i> Ehr.	-	+	+
Dinophyta				
40	<i>Glenodinium edax</i> Schill. (= <i>Tyrannodinium edax</i> (Schill.) Cal.)	-	+	-
41	<i>Peridinium cinctum</i> (Müll.) Ehrb.	-	+	-
42	<i>Peridinium inconspicuum</i> Lemm.	+	-	+
43	<i>Ceratium hirundinella</i> (Müll.) Schrank	SDB	+	-
Chrysophyta				
44	<i>Chrysococcus cordiformis</i> Naum.	+	+	-
45	<i>Chrysococcus ovalis</i> Lac. (= <i>Kephyrion ovale</i> (Lac.) Hub.-Pest.)	SDN	-	+
46	<i>Chrysococcus rufescens</i> var. <i>rufescens</i> Klebs.	-	+	-

№	Видовой состав	Сезоны года		
		Весна	Лето	Осень
47	<i>Chrysococcus punctiformis</i> Pasch.	-	+	-
48	<i>Kephyrion ovum</i> Pasch.	+	+	+
49	<i>Kephyrion spirale</i> Conrad.	+	-	+
50	<i>Kephyrion cupuliforme</i> Conrad.	-	+	-
51	<i>Kephyrion moniliferum</i> (Schmid.) Bourelly (= <i>Stenokalyx moniliferus</i> Schmid.)	+	+	+
52	<i>Dinobryon bavaricum</i> Imh.	SDN	+	+
53	<i>Dinobryon cylindricum</i> Imh.	SDN	+	+
54	<i>Dinobryon divergens</i> Imh.	DN	DN;DB	+
55	<i>Dinobryon sertularia</i> Ehr.	-	+	-
56	<i>Dinobryon sociale</i> Ehr.	-	+	-
57	<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>stipitatum</i> (Stein) Lemm. (= <i>Dinobryon stipitatum</i> Stein.)	-	+	-
58	<i>Dinobryon suecicum</i> Lemm.	-	+	-
59	<i>Dinobryon spirale</i> Iwan.	+	-	+
60	<i>Pseudokephyrion entzii</i> Corn.	+	+	-
61	<i>Mallomonas acaroides</i> Perty em. Iwan.	+	-	+
62	<i>Mallomonas elongata</i> Reverd.	-	-	+
63	<i>Mallomonas caudata</i> Iwan.	-	+	-
64	<i>Mallomonas coronata</i> Boloch.	+	+	-
65	<i>Mallomonas tonsurata</i> Teil.	-	-	+
66	<i>Mallomonas fresenii</i> Kent.	-	+	-
67	<i>Bitrichia chodatii</i> (Reverd.) Chodat.	-	+	-
68	<i>Synura uvella</i> Ehr.	+	-	+
69	<i>Chrysopyxis urna</i> Korsh.	-	+	-
Bacillariophyta				
70	<i>Stephanodiscus astraea</i> (Kütz.) Grun. (= <i>Cyclotella astraea</i> Kütz.)	+	-	-
71	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grun.	+	+	+
72	<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz. (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>meneghiniana</i> Kütz.)	-	+	-
73	<i>Cyclotella schumannii</i> (Grun.) Håkansson (= <i>C. kuetzingiana</i> var. <i>schumannii</i> Grun.)	-	+	-
74	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. ex Kütz.	-	+	-
75	<i>Discostella stelligera</i> (Cleve et Grun.) Houk et Klee (= <i>Cyclotella meneghiniana</i> var. <i>stelligera</i> )	-	+	+
76	<i>Puncticulata bodanica</i> (Eulens. ex Grun.) Håkansson (= <i>Cyclotella bodanica</i> Eulens. ex Grun.)	+	DB	+
77	<i>Puncticulata comta</i> (Kütz.) Håkansson. (= <i>Cyclotella comta</i> Kütz.)	+	+	+
78	<i>Puncticulata radiosa</i> (Grun.) Håkansson (= <i>Cyclotella comta</i> var. <i>radiosa</i> Grun.)	+	+	+
79	<i>Melosira varians</i> Ag.	+	+	-
80	<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müll.) Sim. (= incl. f. <i>curvata</i> O. Müll., f. <i>islandica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica</i> ssp. <i>helvetica</i> (O. Müll.) Sim.; <i>Melosira islandica</i> O. Müll.)	DB;DN	+	DB
81	<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehr.) Sim. (= <i>Gaillonella granulata</i> Ehr.)	+	DB	SDB
82	<i>Aulacoseira distans</i> (Ehr.) Sim. (= <i>Gaillonella distans</i> Ehr.)	+	-	+
83	<i>Aulacoseira alpigena</i> Grun. Kram. (= <i>Melosira distans</i> var. <i>alpigena</i> Grun.)	-	-	+
84	<i>Aulacoseira italica</i> f. <i>italica</i> (Ehr.) Dav. (= <i>Aulacoseira italica</i> (Ehr.) Sim.; <i>Gaillonella italica</i> Ehr.)	+	+	+
85	<i>Aulacoseira subarctica</i> (Müll.) Haw. em. Genkal (= <i>Melosira italica</i> ss. <i>subarctica</i> (Müll.))	+	-	+
86	<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun.) Sim.	-	+	-
87	<i>Fragilaria constricta</i> Ehr.	-	+	-
88	<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitt.	+	+	DB;DN
89	<i>Fragilaria pinnata</i> Ehr.	+	+	-
90	<i>Synedra acus</i> Kütz.	-	+	+
91	<i>Synedra amphicephala</i> var. <i>amphicephala</i> Kütz.	-	+	-
92	<i>Synedra ulna</i> var. <i>ulna</i> (Nitzsch.) Ehr.	+	-	+
93	<i>Asterionella formosa</i> var. <i>formosa</i> Hass.	SDN	+	SDB
94	<i>Diatoma tenuis</i> Ag. (= <i>D. elongatum</i> (Lyngb.) Ag.; <i>Diatoma tenuis</i> var. <i>elongatum</i> Lyngb.)	-	+	-
95	<i>Tabellaria fenestrata</i> (Lyngb.) Kütz. (= <i>Diatoma fenestrata</i> Lyngb.)	DB;DN	DB;DN	DB;DN

№	Видовой состав	Сезоны года		
		Весна	Лето	Осень
96	<i>Tabellaria flocculosa</i> (Roth.) Kütz.(incl. var. <i>ventricosa</i> (Kütz.)Grun.) (= <i>T. ventricosa</i> Kütz.; <i>Conferva flocculosa</i> Roth.)	+	+	+
97	<i>Achnanthes calcar</i> Cl. (= <i>Gliviczia calcar</i> (Cl.) Kulikov., Lang.- Bert. et. Witkow.	-	+	-
98	<i>Achnanthes lanceolata</i> (Breb. exKütz.) Grun.	+	-	-
99	<i>Achnanthes borealis</i> Cl.	+	-	-
100	<i>Achnanthes gracillima</i> Hust.	+	-	+
101	<i>Eunotia praerupta</i> var. <i>praerupta</i> Ehr.	-	+	-
102	<i>Eunotia septentrionalis</i> Østr.	+	-	-
103	<i>Eunotia formica</i> Ehr.	-	-	+
104	<i>Eunotia sudetica</i> Müll.	-	-	+
105	<i>Meridion circulare</i> (Grev.) Ag.	+	-	-
106	<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kütz.) Rabenh.	DB	-	+
107	<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehr.	-	-	+
108	<i>Gomphonema constrictum</i> Ehr.	+	-	-
109	<i>Gomphonema parvulum</i> (Kütz.) Kütz.	-	-	+
110	<i>Pinnularia viridis</i> var. <i>viridis</i> (Nitzsch.) Ehr.	SDB	-	-
111	<i>Pinnularia interrupta</i> W. Sm.	+	-	-
112	<i>Surirella dydima</i> var. <i>dydima</i> Kütz.	+	-	-
113	<i>Navicula dicephala</i> (Ehr.) W. Sm.	-	+	-
114	<i>Navicula cryptocephala</i> var. <i>cryptocephala</i> Kütz.	+	-	+
115	<i>Navicula gracilis</i> Ehr.	+	-	+
116	<i>Navicula exigua</i> (Greg.) Grun.	-	-	+
117	<i>Navicula longirostris</i> Hust.	-	+	-
118	<i>Navicula rotaeana</i> (Rabench.) Grun.	-	+	-
119	<i>Navicula radiosa</i> Kütz.	+	-	-
120	<i>Navicula salinarum</i> f. <i>capitata</i> Schulz	-	+	-
121	<i>Cocconeis pediculus</i> Ehr.	-	+	-
122	<i>Cocconeis placentula</i> var. <i>placentula</i> Ehr.	SDB	-	-
123	<i>Diploneis smithii</i> var. <i>smithii</i> (Bréb.) Cl.	-	+	-
124	<i>Diploneis elliptica</i> var. <i>elliptica</i> (Kütz.) Cl.	-	+	-
125	<i>Eucocconeis elliptica</i> Savel. – Dolg.	SDB	-	-
126	<i>Eucocconeis onegensis</i> Wisl. et Kolbe	DB	-	-
127	<i>Frustulia rhomboides</i> var. <i>saxonica</i> (Rabenh.) D. T.	-	+	-
128	<i>Cymbella lanceolata</i> var. <i>lanceolata</i> (Ehr.) Kirchn. (incl. var. <i>notata</i> Wisl. et Poretzky)	-	+	-
129	<i>Cymbella ventricosa</i> var. <i>ventricosa</i> Kütz.	-	+	-
130	<i>Cymbella pusilla</i> Grun.	+	-	-
131	<i>Cymatopleura solea</i> var. <i>apiculata</i> (W. Sm.) Ralfs	-	+	-
132	<i>Neidium iridis</i> var. <i>iridis</i> (Ehr.) Cl.	-	+	-
133	<i>Amphora coffeaformis</i> var. <i>coffeaformis</i> (Ag.) Kütz.	-	+	-
134	<i>Amphora ovalis</i> (Kütz.) Kütz. (incl. var. <i>gracilis</i> (Ehr.) Cl.)	-	+	-
135	<i>Amphora pediculus</i> (Kütz.) Grun. (= <i>A. ovalis</i> var. <i>pediculus</i> (Kütz.) V.H.)	-	+	-
136	<i>Amphora copulata</i> (Kütz.) Schoem. et Archib. (= <i>Frustulia copulata</i> Kütz.)	+	-	-
137	<i>Amphiprora ornata</i> Bail.	-	+	-
138	<i>Nitzschia acicularis</i> (Kütz.) W. Sm.	-	+	-
139	<i>Nitzschia angustata</i> var. <i>angustata</i> (W. Sm.) Grun.	-	+	-
140	<i>Nitzschia acuta</i> Cl.	+	-	-
141	<i>Nitzschia dissipata</i> (Kütz.) Raben.(= <i>Synedra dissipata</i> Kütz. .)	+	+	+
142	<i>Nitzschia hungarica</i> Grun.	-	+	-
143	<i>Nitzschia tryblionella</i> var. <i>levidensis</i> (W. Sm.) Grun.	-	+	-
144	<i>Nitzschia tubicola</i> Grun.	+	-	+
145	<i>Campylodiscus noricus</i> Ehr. ex Kütz. (incl. var. <i>costatum</i> (W. Sm.) Grun.)	-	+	-



№	Видовой состав	Сезоны года		
		Весна	Лето	Осень
Euglenophyta				
146	<i>Trachelomonas volvocina</i> var. <i>volvocina</i> Ehr. (Ehr.)	-	+	-
147	<i>Trachelomonas volvocina</i> var. <i>subglobosa</i> Lemm. sens. Swir.	-	+	-
148	<i>Trachelomonas intermedia</i> Dang.	+	-	+
149	<i>Euglena caudata</i> Hübn.	+	-	-
150	<i>Euglena proxima</i> Dang.	+	-	+
Chlorophyta				
151	<i>Chlamydomonas globosa</i> Snow	-	+	-
152	<i>Chlamydomonas incerta</i> Pasch.	-	+	-
153	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> Dang.	SDN	SDN	+
154	<i>Chlamydomonas monadina</i> (Ehr.) Stein	+	+	+
155	<i>Lobomonas stellata</i> Chod.	-	+	-
156	<i>Gonium sociale</i> (Dujard.) Warm.	-	+	-
157	<i>Pteromonas torta</i> Korsh.	-	+	-
158	<i>Phacotus lenticularis</i> (Ehr.) Dies.	+	+	-
159	<i>Eudorina elegans</i> Ehr.	+	+	-
160	<i>Pandorina morum</i> (Müll.) Bory	-	+	-
161	<i>Planktosphaeria gelatinosa</i> Smith.	-	+	-
162	<i>Sphaerocystis schroeteri</i> Chod.	+	+	-
163	<i>Didymocystis bicellularis</i> (Chod.)Kom. (= <i>Desmodesmus bicellularis</i> (Chod.) An)	+	-	-
164	<i>Didymocystis inconspicua</i> Korsh. (= <i>Pseudodidymocystis inconspicua</i> (Korsh.) Hind.)	-	-	+
165	<i>Pediastrum duplex</i> Meyen.	-	+	-
166	<i>Coenococcus planctonicus</i> Korsh.	+	DN	-
167	<i>Coenochloris fottii</i> (Hind.) Tsarenko	SDB	-	-
168	<i>Coenochloris ovalis</i> Korsh.	-	+	-
169	<i>Stichococcus subtilis</i> (Kütz.) Klerc.	+	-	-
170	<i>Chlorella vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i> Beij.	+	+	+
171	<i>Tetrachlorella alternans</i> (Smith) Korsh.	+	-	-
172	<i>Oocystis elliptica</i> West	-	+	-
173	<i>Oocystis lacustris</i> Chod.	-	+	-
174	<i>Oocystis submarina</i> Lag.	-	+	-
175	<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Kom.-Leg.	SDN	+	+
176	<i>Monoraphidium griffithii</i> (Berk.) Kom.- Leg.	+	-	-
177	<i>Ankyra juday</i> (Smith) Fott	-	+	-
178	<i>Coelastrum cambricum</i> Arch.	-	+	-
179	<i>Coelastrum sphaericum</i> Näg.	-	+	-
180	<i>Botryococcus braunii</i> Kütz.	+	+	-
181	<i>Crucigenia quadrata</i> Mor.	-	DN	-
182	<i>Crucigenia tetrapedia</i> (Kirch.) Kuntz. (= <i>Lemmermannia tetrapedia</i> (Kirch.) Lem.	+	+	+
183	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (Turp.) Bréb.	-	SDN	-
184	<i>Scenedesmus bijugatus</i> var. <i>bijugatus</i> (Turp.) Kütz.(= <i>S. ecornis</i> .f. <i>ecornis</i> (Ralfs.) Chod)	+	-	-
185	<i>Scenedesmus obtusus</i> Mey.	-	-	+
186	<i>Desmodesmus armatus</i> (Chod.) Heg.	+	-	+
187	<i>Elakatothrix genevensis</i> (Reverd.) Hind.	-	+	+
188	<i>Elakatothrix gelatinosa</i> Wille	+	-	-
189	<i>Ankistrodesmus graciles</i> (Rein.) Korsh. (= <i>Messastrum gracile</i> (Rein.) Garc.	+	-	-
190	<i>Ankistrodesmus fusiformis</i> Corda	-	-	+
191	<i>Cosmarium ornatum</i> var. <i>ornatum</i> Ralfs ex Ralfs	-	+	-
192	<i>Cosmarium bioculatum</i> Bréb. ex Ralfs	+	-	+
193	<i>Cosmarium phaseolus</i> Bréb. ex Ralfs	-	-	+
194	<i>Kirchneriella contorta</i> (Shmidle) Bohl. (= <i>Raphidocelis danubiana</i> (Hind.) Marv. et al.)	-	+	-

№	Видовой состав	Сезоны года		
		Весна	Лето	Осень
195	<i>Korschikoviella limnetica</i> (Lemm.) Silva	+	+	-
196	<i>Koliella spiculiformis</i> (Visch.) Hind.	+	+	+
197	<i>Koliella longiseta</i> (Visch.) Hind.	+	+	+
198	<i>Koliella spirotaenia</i> (West) Hind.	-	+	-
199	<i>Ulothrix zonata</i> var. <i>zonata</i> (Web. et. Mohr.) Kütz.	-	+	-
200	<i>Gloeotila spiralis</i> Chod. (= <i>Stichococcus contortus</i> (Lemm.) Hind.)	-	+	-
201	<i>Closterium gracile</i> var. <i>gracile</i> Bréb. ex Ralfs	+	+	-
202	<i>Closterium pusillum</i> Hantz.	+	+	-
203	<i>Staurastrum paradoxum</i> Mey. ex Ralfs	-	+	+
204	<i>Staurastrum longipes</i> (Nord) Teil. (= <i>Staurastrum paradoxum</i> var. <i>longipes</i> Nord.)	-	-	+

**Примечание:** «+» – вид присутствует в сообществе фитопланктона; «-» – вид отсутствует в сообществе фитопланктона; SDN – вид субдоминант по численности; SDB – вид субдоминант по биомассе; DN – вид доминант по численности; DB – вид доминант по биомассе

### 3.2. Весеннее развитие фитопланктона

В мае 2023 года в районе о. Кижы было определено 97 видовых и внутривидовых таксонов рангом ниже рода водорослей из семи систематических групп: Bacillariophyta – 38 (39.2%); Chlorophyta – 30 (31%); Cyanobacteria – 10 (10.3%); Chrysophyta – 12 (12.3%); Euglenophyta – 3 (3%); Cryptophyta – 2 (2.1%); Dinophyta – 2 (2.1%).

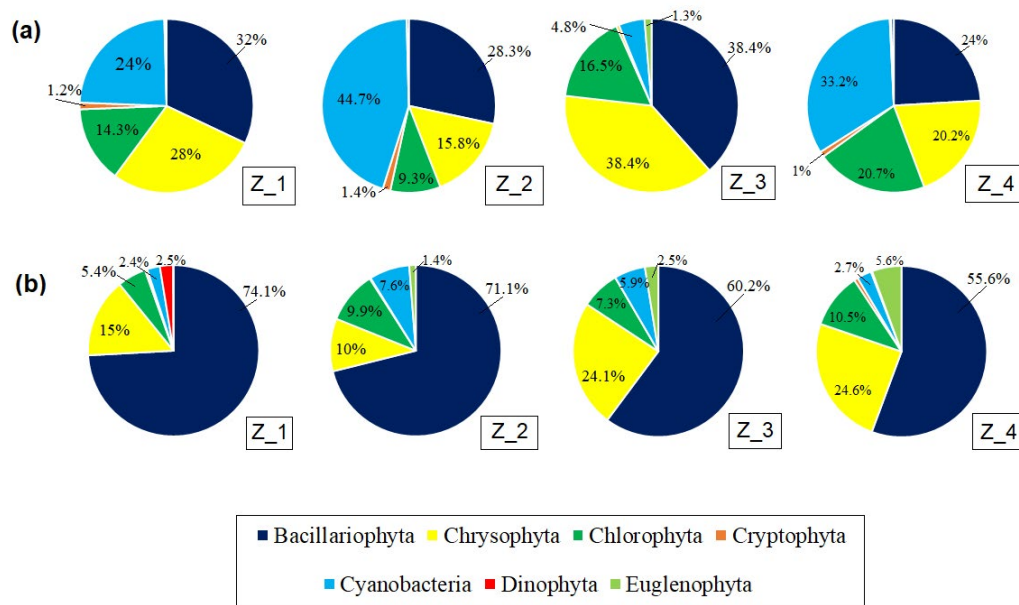
В весенний период в 2023 году на станции Z\_1 преобладали диатомовые водоросли – 32% по численности (N) и 74.1 % по биомассе (B). Доминирующими видами из диатомей выступали – *Aulacoseira islandica* (16.4% от  $V_{\text{общ}}$ ), *Euocconeis onegensis* (11.5% от  $V_{\text{общ}}$ ), *Tabellaria fenestrata* (11% от  $V_{\text{общ}}$ ). Кроме того, в доминирующий комплекс входили золотистые водоросли (28% по N; 15% по B) (доминант *Dinobryon divergens* 11.2% от  $N_{\text{общ}}$ ) и цианобактерии (24% по N; 2.4% по B) (доминант – *Aphanocapsa inserta* – 20.3 % от  $N_{\text{общ}}$ ) (Рис. 3). Возле причала водного транспорта на о. Кижы, где располагается музей-заповедник «Кижы» (ст. Z\_2) пре-

обладали по N цианобактерии (44.7%), среди них *Aphanocapsa elachista* до 27% от  $N_{\text{общ}}$ , диатомовые (28.3%), в основном *A. islandica* (15% от  $N_{\text{общ}}$ ) и золотистые водоросли (15.8%) – виды рода *Dinobryon*. По B доминировали диатомеи до 71.1% (*A. islandica* – 38% от  $V_{\text{общ}}$ ) (см. Рис. 3).

В районе ст. Z\_3, с восточной стороны острова, по N и B доминировали диатомовые и золотистые водоросли (по N – 38.4% вклад каждого отдела; по B – 60.2% и 24.1%, соответственно). Диатомеи были представлены *Tabellaria fenestrata* (31% от  $V_{\text{общ}}$ ) и видами рода *Aulacoseira* (до 14% от  $N_{\text{общ}}$ ), золотистые водоросли состояли из видов рода *Dinobryon* (доминант: *D. divergens*) (18% от  $N_{\text{общ}}$ ) и видов рода *Kephyrion* (субдоминант: *Kephyrion ovale*). Кроме того, по численности преобладали и зеленые водоросли (16.5%) (субдоминанты: *Monoraphidium contortum*, *Stichococcus subtilis*) (см. Рис. 3). В юго-восточной части исследуемого района (ст. Z\_4) доминантами по N в весенний период являлись цианобактерии (до 33.2%), в основном за счет развития *Merismopedia punctata* (16% от  $N_{\text{общ}}$ ). По N и B активно развива-

**Таблица 2.** Содержание биогенных элементов в воде района Кижских шхер Онежского озера в период открытой воды 2023 года

Станция	Дата отбора	$P_{\text{мин}}$ , мкг/л	$P_{\text{общ}}$ , мкг/л	$NH_4^+$ , мгN/л	$NO_2^-$ , мгN/л	$NO_3^-$ , мгN/л	$N_{\text{общ}}$ , мгN/л	$N_{\text{орг}}$ , мгN/л	Si, мгSi/л
Z_1	Май	1	4	0.02	0.000	0.03	0.32	0.27	0.53
	Июль	1	11	0.05	0.001	0.01	0.24	0.17	0.39
	Сентябрь	1	17	0.01	0.000	0.00	0.27	0.26	0.26
Z_2	Май	1	6	0.02	0.000	0.04	0.29	0.23	0.52
	Июль	2	10	0.05	0.001	0.01	0.24	0.18	0.31
	Сентябрь	1	10	0.01	0.000	0.00	0.32	0.31	0.25
Z_3	Май	1	1	0.02	0.000	0.08	0.31	0.21	0.39
	Июль	1	8	0.05	0.001	0.04	0.31	0.21	0.28
	Сентябрь	1	11	0.01	0.000	0.02	0.27	0.23	0.27
Z_4	Май	1	5	0.02	0.000	0.04	0.32	0.26	0.47
	Июль	1	12	0.04	0.001	0.03	0.25	0.19	0.30
	Сентябрь	1	11	0.01	0.000	0.02	0.28	0.25	0.25



**Рис.3.** Структура фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера (станции отбора проб –Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) в мае 2023 года: (a) – по численности, (b) – по биомассе.

лись диатомеи (24% по N; 55.6% по B) (доминанты: *A. islandica* 27% от  $V_{\text{общ}}$ , *Tabellaria fenestrata* 11% от  $V_{\text{общ}}$ ) и золотистые водоросли (20.2% по N; 24.6% по B) – *D. divergens* (11.2% от  $V_{\text{общ}}$ ). Также достаточно активно вегетировали зеленые водоросли (до 20.7% по N; 10.5% по B) (субдоминанты: *Clamydomonas reinhardii*, *Coenococcus fottii*) (см. Рис. 3). В наименьшем количестве на всех станциях исследования в районе о. Кизи в мае 2023 года были отмечены криптофитовые (до 1.4% по N), динофитовые (до 5.6% по B) и эвгленовые водоросли (до 2.5% по B) (см. Рис. 3).

В результате анализа сапробиологических характеристик видов фитопланктона, обнаруженных в районе Кижских шхер Онежского озера в мае 2023 года ( $S = 1.6 \pm 0.05$ ) данный тип вод относится к  $\beta$ -мезосапробной зоне (3 класс качества воды, удовлетворительно-чистая) (Таблица 3).

Общая численность ( $N_{\text{общ}}$ ) фитопланктона изменялась от 750 до 2003 тыс. кл./л., а общая биомасса ( $V_{\text{общ}}$ ) от 0.61 до 1.21 мг/л (см. Таблица 3). В юго-восточной части района исследования от о. Кизи (ст. Z\_4) показатели  $N_{\text{общ}}$  были выше по сравне-

нию с другими ст.1 4.2 мкм<sup>3</sup>) и средних размеров – зеленых водорослей *C. Reinhardii* ( $V_{\text{кл.}} = 590.6$  мкм<sup>3</sup>) и *C. fottii* ( $V_{\text{кл.}} = \text{до } 47.8$  мкм<sup>3</sup>).  $V_{\text{общ}}$  на ст. Z\_4 формировалась крупноклеточными диатомовыми *A. islandica* ( $V_{\text{кл.}} = \text{до } 1952$  мкм<sup>3</sup>) и *T. fenestrata* ( $V_{\text{кл.}} = 2059$  мкм<sup>3</sup>), а также золотистыми *D. divergens* ( $V_{\text{кл.}} = 914$  мкм<sup>3</sup>). Кроме того, рядом с причалом водного транспорта на о. Кизи (ст. Z\_2)  $N_{\text{общ}}$  (см. Таблица 3) достигала высоких значений за счет активного развития цианобактерий, а именно мелкоклеточной цианофитовой *A. elachista* ( $V_{\text{кл.}} = 22.5$  мкм<sup>3</sup>). Полученные количественные показатели развития планктонного фитоценоза в весенний период изучаемого района характеризуют его как олиготрофный участок Онежского озера.

Концентрация хлорофилла *a* в воде в мае 2023 года на всем исследованном участке была равномерна, за исключением ст. Z\_1, где было отмечено наименьшее значение пигмента (2 мкг/л). Содержание хлорофилла *a* (2-4 мкг/л) в воде находилось в пределах олиго- $\alpha$ -мезотрофии (см. Таблица 3).

**Таблица 3.** Показатели развития фитопланктона и индексы сапробности в районе о. Кизи Онежского озера (май, 2023 год)

Показатель	Станции отбора проб			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Количественные показатели				
$N_{\text{общ}}$ , тыс.кл./л	968	1647	750	2003
$V_{\text{общ}}$ , мг/л	0.98	0.96	0.61	1.21
Хлорофилл <i>a</i>				
Хл <i>a</i> , мкг/л	2	3.7	3.6	4
Индекс сапробности				
S	1.66	1.43	1.59	1.61

### 3.3. Развитие фитопланктона в период биологического лета

В июле 2023 года в исследуемом районе было обнаружено 138 видовых и внутривидовых таксонов рангом ниже рода водорослей из семи систематических групп: Bacillariophyta – 44 (32%); Chlorophyta – 39 (28.3%); Cyanobacteria – 25 (18%); Chrysophyta – 19 (13.8%); Euglenophyta – 2 (1.5%); Cryptophyta – 6 (4.3%); Dinophyta – 3 (2.1%).

Летом 2023 г.в северо-западной части от о. Кизи (ст. Z\_1) доминировали по N Chlorophyta (35.5%; доминант *Crucigenia quadrata*–20.1% от N<sub>общ</sub>) и Cyanobacteria (41.9%)–виды-доминанты – *Gomphosphaeria lacustris* (25.1% от N<sub>общ</sub>), *Gloeocapsa limnetica* (13.6% от N<sub>общ</sub>). По N и по В преобладали Chrysophyta (15.8% и 80%, соответственно)– преобладающий вид *Dinobryon divergens* (10% от N<sub>общ</sub>; 68% от В<sub>общ</sub>) (Рис. 4). На станции Z\_2 доминировали по N Cyanobacteria (52.5%; *Aphanocapsa elachista* – 16.2% от N<sub>общ</sub>) и Chlorophyta (22.7%; виды рода Chlorococcales). По N и по В в доминирующий комплекс входили Chrysophyta (12.5% и 30.7%, соответственно; доминант *Dinobryon divergens* 22.5% от В<sub>общ</sub>) и Bacillariophyta (9.9% и 52.5%, соответственно; доминанты *Tabellaria fenestrata* 26.4% от В<sub>общ</sub>, *Aulacoseira granulata* 13% от В<sub>общ</sub>) (см. Рис. 4).

В северо-восточном районе (ст. Z\_3) в летний период по N доминировали Cyanobacteria (65%) и Chlorophyta (12.4%). По N и по В преобладали Chrysophyta (13.8% и 41%, соответственно) и Bacillariophyta (по В – 43.7%). В доминантный комплекс на ст. Z\_3 входили следующие виды – *Dinobryon divergens* (32.5% от В<sub>общ</sub>), *Aphanothece clathrata* (28.3% от N<sub>общ</sub>), *Puncticulata bodanica* (20.8% от В<sub>общ</sub>), *Dolichospermum spiroides* (11.7% от N<sub>общ</sub>), *Aphanocapsa elachista* (10.6% от N<sub>общ</sub>) (см. Рис. 4). В юго-восточной части района Кижских шхер Онежского озера

(ст. Z\_4) по N доминировали Chlorophyta (25.9%, доминант: *Coenococcus planctonicus* – 13% от N<sub>общ</sub>) и Cyanobacteria (41.4%, доминирующие виды: *Aphanocapsa elachista*–13% от N<sub>общ</sub>, *Gomphosphaeria lacustris*– 15% от N<sub>общ</sub>). По N и по В преобладали Chrysophyta (21.1% и 42.5%, соответственно; доминант *Dinobryon divergens*–31.5% от N<sub>общ</sub>). На всех станциях исследования в районе Кижских шхер летом в 2023 г. наименьшее развитие получили отделы микроводорослей – Cryptophyta (до 1.7% по N), Dinophyta (до 6.4% по В) и Euglenophyta (до 8.2% по В) (см. Рис. 4).

В июле 2023 года район о. Кизи можно отнести к олигосапробной зоне (2 класс качества воды, чистая) на основе рассчитанного S (1.52±0.03) (Таблица 4). В<sub>общ</sub> фитопланктона находилась в пределах от α-β-мезотрофии до α-евтрофии (1.54-6.64 мг/л), а концентрация Хл а – в пределах олиго-α-мезотрофии (1.1-4.6 мкг/л). N<sub>общ</sub> фитопланктона варьировала от 1450 до 4983 тыс.кл./л (см. Таблица 4). Наибольшее содержание Хл а в воде было отмечено на ст. Z\_1, где активно вегетировали Chlorophyta (35.5%) – одни из самых продуктивных отделов фитопланктона (см. Таблица 4).

На ст. Z\_2, где сосредоточено наибольшее количество водного транспорта, биомасса фитопланктона достигала 6.64 мг/л, причем активно развивались мелкоклеточные цианобактерии (*Aphanocapsa elachista*, V<sub>кл.</sub> = 2 мкм<sup>3</sup>), зеленые водоросли (виды sp. *Crucigenia*, *Oocystis*, *Scenedesmus*, *Pandorina*, *Coenococcus*, *Elakatohris*, *Koliella*, *Chlamydomonas*, V<sub>кл.</sub> = от 14 до 270 мкм<sup>3</sup>) и водоросли более крупного размера – золотистые и диатомовые. Весной также отмечалось активное развитие золотистой *Dinobryon divergens* и диатомовой *Tabellaria fenestrata*, но именно в летний период объемы клеток этих двух видов были выше соответственно в шесть и в два раза, чем в

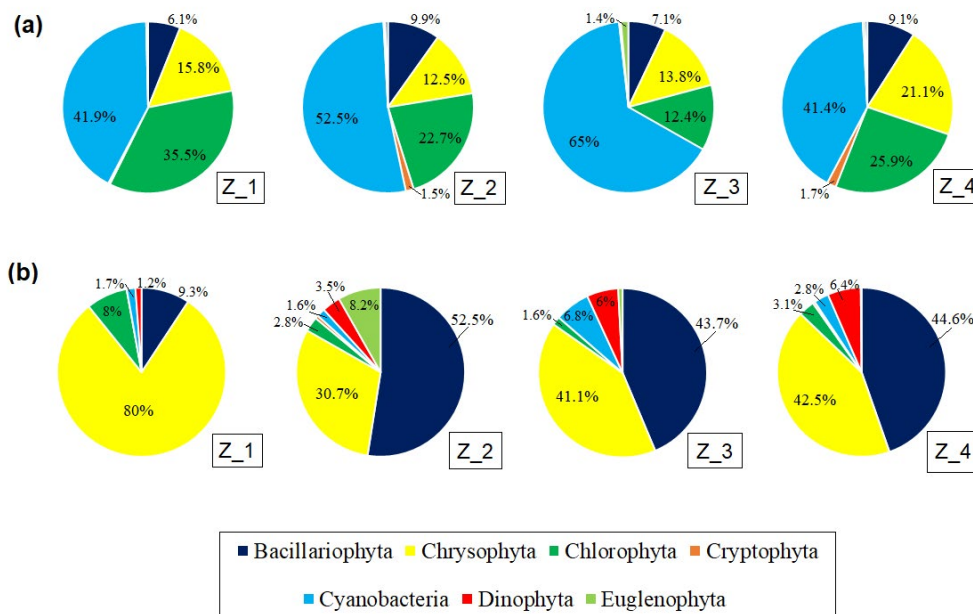


Рис.4. Структура фитопланктона в районе о. Кизи Онежского озера (станции отбора проб –Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) в июле 2023 года: (a) – по численности, (b) – по биомассе.

**Таблица 4.** Показатели развития фитопланктона и индексы сапробности в районе о. Кизи Онежского озера (июль, 2023 год)

Показатель	Станции отбора проб			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Количественные показатели				
$N_{\text{общ}}$ , тыс.кл./л	1743	4983	2358	1450
$V_{\text{общ}}$ , мг/л	1.54	6.64	3.37	2.40
Хлорофилл <i>a</i>				
Хл <i>a</i> , мкг/л	4.6	3.2	1.1	2.3
Индексы сапробности				
S	1.46	1.54	1.61	1.47

весенний период, что связано с активным ростом самих клеток. Длина домика в кустистых колониях *Dinobryon divergens* достигала 68  $\mu$ , а ширина – 13  $\mu$  ( $V_{\text{кл.}} = 5978 \text{ мкм}^3$ ). Кроме того, идентифицированы колонии *Tabellaria fenestrata* разных размеров, где длина створки достигала 107  $\mu$ , а высота септы 18.2  $\mu$  (средний  $V_{\text{кл.}} = 6364 \text{ мкм}^3$ ). Также активное развитие получила крупная диатомовая *Aulacoseira granulata* с длиной и высотой створки 42  $\mu$  и 28  $\mu$ , соответственно ( $V_{\text{кл.}} = 25848 \text{ мкм}^3$ ).

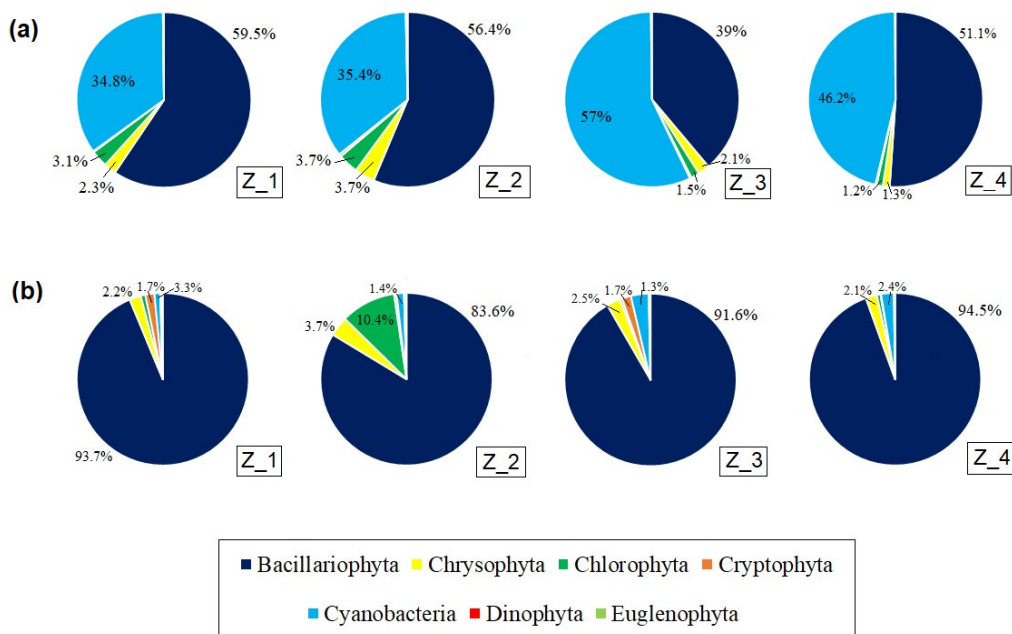
На ст. Z\_3 высокая  $N_{\text{общ}}$  (см. Таблица 4) была сформирована цианобактериями *Aphanothece clathrata*, *Aphanocapsa elachista* ( $V_{\text{кл.}} = \text{до } 3 \text{ мкм}^3$ ) и *Dolichospermum spiroides* ( $V_{\text{кл.}} = \text{до } 331 \text{ мкм}^3$ ), а  $V_{\text{общ}}$  – крупной золотистой *Dinobryon divergens* и центрической диатомовой *Puncticulata bodanica* ( $V_{\text{кл.}} = \text{до } 21086 \text{ мкм}^3$ ), диаметр панциря которой достигал 50  $\eta$ .

### 3.4. Развитие осеннего фитопланктона

В результате исследования сообщества фитопланктона района Кижских шхер Онежского озера

в сентябре 2023 г. было идентифицировано 82 вида водорослей из семи систематических групп: Bacillariophyta – 28 (34.1%); Chlorophyta – 20 (24.4%); Cyanobacteria – 15 (18.3%); Chrysophyta – 13 (15.9%); Euglenophyta – 2 (2.4%); Cryptophyta – 3 (3.7%); Dinophyta – 1 (1.2%).

В альгофлоре в осенний период на станции Z\_1 доминировали диатомеи (59.5% по N; 93.7% по B) и цианобактерии (34.8% по N). Представитель диатомовых водорослей, в основном летнего комплекса фитопланктона, *Fragilaria crotonensis* выступал абсолютным доминантом как по численности (54%), так и по биомассе (74.4%). Среди цианобактерий доминантом являлся *Aphanothece clathrata* (11% от  $N_{\text{общ}}$ ) (Рис. 5). На станции Z\_2 осенью доминировали по N диатомовые (56.4%) и цианобактерии (35.4%), среди них *Fragilaria crotonensis* (46% от  $V_{\text{общ}}$ ), *Aphanocapsa inserta* (15.5% от  $N_{\text{общ}}$ ). По B доминировали диатомовые до 83.6% (*F. crotonensis* – 57% от  $V_{\text{общ}}$ ). Обилие зеленых (10.4%) наблюдалось за счет развития *Coelosphaerium kuetzingianum* (10% от  $V_{\text{общ}}$ ) (см. Рис. 5).

**Рис.5.** Структура фитопланктона в районе о. Кизи Онежского озера (станции отбора проб –Z\_1; Z\_2; Z\_3; Z\_4) в сентябре 2023 года: (a) – по численности, (b) – по биомассе.



В северо-восточном районе шхер (ст. Z\_3) по N доминировали цианобактерии (57%) и диатомовые (39%), по В – диатомовые (91.6%). Доминантный комплекс был представлен *Fragilaria crotonensis* (23% от N<sub>общ</sub>; 40% от В<sub>общ</sub>), *Tabellaria fenestrata* (4.2% от N<sub>общ</sub>; 17.7% от В<sub>общ</sub>), *Gomphosphaeria lacustris f.compacta* (20.7% от N<sub>общ</sub>), *Aphanothece clathrata* (16.1% от N<sub>общ</sub>), *Oscillatoria limosa* (14.8% от N<sub>общ</sub>) (см. Рис. 5). В юго-восточной части района Кижских шхер Онежского озера (ст. Z\_4) доминантами по N и по В в осенний период выступали диатомовые водоросли (51.1% и 94.5%, соответственно) за счет активного развития *Fragilaria crotonensis* (42% от N<sub>общ</sub>; 64% от В<sub>общ</sub>), и цианобактерии (до 46.2%) в основном за счет развития *Aphanothece clathrata* (15% от N<sub>общ</sub>), *Oscillatoria limosa* (14% от N<sub>общ</sub>). В сентябре 2023 года в районе Кижских шхер Онежского озера в наименьшем количестве были встречены Cryptophyta (до 1.7% по N), Dinophyta (до 0.4% по В) и Euglenophyta (до 0.3% по В) (см. Рис. 5).

В результате сапробиологического анализа микроводорослей в районе о. Кижы в сентябре 2023 года, S был выше ( $2.1 \pm 0.14$ ), чем в весенний и осенний периоды, что связано с более высоким количественным развитием  $\beta$ -мезосапробных видов, таких как *Fragilaria crotonensis*, *Aphanothece clathrata*, *Oscillatoria tenuis*, *Snowella lacustris*, *Aphanocapsa inserta*. Полученные результаты характеризовали этот район, как  $\beta$ -мезосапробную зону с 3 классом качества воды (удовлетворительно-чистая) (Таблица 5).

В сентябре 2023 года в исследованном районе В<sub>общ</sub> микроводорослей находилась в пределах от  $\alpha$ - $\beta$ -мезотрофии до  $\alpha$ -евтрофии (от 2.86 до 4.92 мг/л), концентрация Хл а (5.8-7.5 мкг/л) – в пределах  $\alpha$ - $\beta$ -мезотрофии, а N<sub>общ</sub> варьировала от 4285 до 8645 тыс. кл/л (см. Таблица 5). Наибольшая концентрация Хл а была отмечена на ст. Z\_2 и ст. Z\_3, на фоне активного развития диатомовых водорослей и цианобактерий вегетировали и продуктивные виды зеленых водорослей (до 10.4%). Самые высокие значения биомассы была отмечена на ст. Z\_4, где наибольший вклад внесли диатомовые водоросли (94.5%), а именно диатомовая с многочисленными колониями *Fragilaria crotonensis* ( $V_{кл.} = 873 \text{ мкм}^3$ ), и мелкоклеточные цианобактерии *Aphanothece clathrata* и *Oscillatoria limosa* ( $V_{кл.} = 50.2 \text{ мкм}^3$ ).

**Таблица 5.** Показатели развития фитопланктона и индексы сапробности в районе о. Кижы Онежского озера (сентябрь, 2023 год)

Показатель	Станции отбора проб			
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Количественные показатели				
N <sub>общ</sub> , тыс.кл./л	5305	4285	6712	8645
В <sub>общ</sub> , мг/л	3.42	2.86	3.33	4.92
Хлорофилл а				
Хл а, мкг/л	5.8	7.5	7.5	6.7
Индексы сапробности				
S	2.42	2.3	1.81	1.95

#### 4. Обсуждение

Одним из важных факторов, определяющим развитие фитопланктона, является температура воды (Reynolds, 2006; Winder and Sommer, 2012). В период исследования в районе Кижских шхер Онежского озера температура поверхностного слоя была в пределах многолетней изменчивости:  $14.9 \pm 0.41^\circ\text{C}$  (май 2023 г.)  $-10.5-19.9^\circ\text{C}$  (1994-2020 гг.);  $18.1 \pm 0.24^\circ\text{C}$  (июль 2023 г.)  $-17.2-20.8^\circ\text{C}$  (1996-2021 гг.);  $14.5 \pm 0.050^\circ\text{C}$  (сентябрь 2023 г.)  $- 9.8-14.2^\circ\text{C}$  (2004-2008 гг.).

Количественное и качественное развитие фитопланктона тесно связано с химическим составом вод, особенно с содержанием биогенных элементов в воде (Reynolds, 2006). На момент исследования концентрации P, N, Si на всех станциях района о. Кижы различались незначительно. Содержание общего фосфора в исследованном районе Онежского озера в среднем составляло 9 мкг/л, что соответствовало олиготрофному типу вод согласно геохимической классификации. Стоит отметить, что такое же значение по содержанию P<sub>общ</sub> было получено в этом районе озера в 2019-2020 гг. (Galakhina et al., 2022), что может свидетельствовать о стабильности экологической обстановки в этом районе озера в последние годы. В Кижских шхерах отмечена сезонная динамика P<sub>общ</sub>: наблюдалось увеличение его концентрации от весны к лету и осени, что было связано с ростом органической формы фосфора в то время, как минеральная оставалась неизменной. Для незагрязненных водных объектов Карелии характерна высокая доля P<sub>орг</sub> в составе P<sub>общ</sub>, которая связана с природными соединениями как автохтонного, так и аллохтонного происхождения (Рыжаков и др., 2016). Как и в случае с фосфором, содержание азотных форм между всех станций Кижских шхер варьировало незначительно. В составе общего азота превалировал N<sub>орг</sub>, на его долю приходилось более 50%, содержание минеральных форм было значительно ниже. Что касается сезонной динамики, то в исследованном районе озера отмечено уменьшение концентрации нитратов от весны (0.03-0.08 мгN/л) к осени (0.00-0.02 мгN/л) вплоть до полного их отсутствия на некоторых станциях. Это является весьма закономерным поскольку в литоральных зонах идет актив-

ное потребление  $\text{NO}_3^-$  фитопланктоном (Сабылина и Рыжаков, 2018). Кроме того, отмечено, что максимальные концентрации  $\text{NH}_4^+$  приходились на летний период (в среднем 0.05 мгN/л).

Кремний играет важную физиологическую роль и участвует в метаболизме клеток диатомовых водорослей (Martin-Jézéquel et al., 2000). Содержание данного элемента в период исследования в районе о. Кижы варьировало от 0.25 до 0.53 мгSi/л. Отличия были обусловлены сезонной динамикой этого элемента: отмечалось снижение содержания Si от весны к осени, что связано с активизацией роста диатомового планктона, поскольку кремний участвует в построении его клеточной стенки (Martin-Jézéquel et al., 2000; Рыжаков и др., 2019).

Одним из важных критериев для развития фитопланктона является соотношение  $N_{\text{общ}}$  к  $P_{\text{общ}}$ . Принято, что для нормального развития фитопланктона среднее отношение N/P в водных экосистемах должно составлять – 16N:1P (Redfield, 1934). На момент исследования в районе о. Кижы Онежского озера соотношение  $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$  варьировало от 240/10 до 320/4 (в мг/л), что указывает на фосфор в качестве лимитирующего фактора для развития фитопланктона в данном районе исследования. Для диатомовых водорослей фосфор имеет второстепенное значение и эти водоросли могут развиваться при очень низких его концентрациях в отличие от цианобактерий, для которых присутствие фосфора в воде значимо. Однако, в период исследования в районе о. Кижы, концентрации общего фосфора были низкими. Возможно, на высокое развитие цианобактерий могло повлиять именно соотношение  $N_{\text{общ}}$  к  $P_{\text{общ}}$ . Известно, что чем ниже соотношение этих двух элементов ( $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}} \leq 29/1$ ), тем больше вероятность доминирования цианобактерий в сообществе фитопланктона (Smith, 1983; Havens et al., 2003; Graham et al., 2004; Harris et al., 2016). Так, в 2023 году в районе исследования было отмечено увеличение численности цианобактерий от весны к осени (от 736 до 3990 тыс. кл./л) при уменьшении соотношения  $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$  от 310 (май) до 15.9 (сентябрь).

Видовой состав фитопланктона в период исследования в целом не претерпел изменений и является характерным для Онежского озера (Вислянская и др., 1999; Чекрыжева, 2012; Смирнова, 2025). В целом сообщество фитопланктона в районе Кижских шхер Онежского озера сформировано типичными представителями диатомовых, зеленых, золотистых водорослей и цианобактерий. Ведущая по видовому разнообразию группа диатомовых представлена классами *Centrophyceae* и *Pennatophyceae*, что характерно для большинства водоемов Арктики и Субарктики (Комулайнен и др., 2006; Гецен, 1985).

По результатам ранних наблюдений (1967-2010 гг.) изучаемого района весной вегетировали диатомовые водоросли, в раннелетний период – золотистые водоросли (виды рода *Dinobryon*), в летний период интенсивно вегетировали мелкоклеточные

точные виды рода *Chlorococcales* и золотистых водорослей (Петрова, 1975; Чекрыжева и Вислянская, 2000; Чекрыжева, 2008). В структуре осеннего фитопланктона при доминировании диатомовых водорослей (в основном – *A. islandica*) интенсивно развивались и цианобактерии – *Oscillatoria*, *Aphanizomenon*, *Woronichinia*, *Coelosphaerium* (Чекрыжева и Вислянская, 2000).

Однако, в связи с высокой температурой поверхности воды в мае 2023 года (до 15.8°C) альгоценоз был представлен не только видами весеннего комплекса (доминант: *Aulacoseira islandica*) диатомовых водорослей, но и летнего (доминант: *Tabellaria fenestrata*). Кроме того, в весенний период активно развивались цианобактерии, зеленые и золотистые водоросли, характерные больше для летнего периода развития фитопланктона. На момент исследования в районе о. Кижы Онежского озера были отмечены невысокие количественные показатели микроводорослей (см. Таблица 2), когда ранее (1994-2005 гг.) в весенний период  $V_{\text{общ}}$  варьировала от 1.10 до 2.50 мг/л, а  $N_{\text{общ}}$  изменялась от 730 до 1320 тыс.кл./л (Вислянская и др., 1999; Сярки и др., 2015). Возможно, максимум развития весеннего фитопланктона в 2023 году пришелся на начало-сердину мая и в наших сезонных наблюдениях был пропущен.

Фитоценоз района Кижских шхер в летний период 2023г. характеризуется высоким уровнем развития фитопланктона (см. Таблица 3). Полученные современные количественные показатели микроводорослей ( $N_{\text{общ}}$ :  $2633.8 \pm 805.68$  тыс. кл./л;  $V_{\text{общ}}$ :  $3.49 \pm 1.11$  мг/л) выходят за рамки доверительного интервала по сравнению с показателями ранних наблюдений ( $N_{\text{общ}}$ :  $1016.1 \pm 437.98$  тыс. кл./л;  $V_{\text{общ}}$ :  $0.73 \pm 0.24$  мг/л). Увеличение общей численности и общей биомассы летнего фитопланктона в последние годы произошло в основном за счет увеличения мелкоклеточных видов цианобактерий (*Aphanocapsa elashista*, *Gomphosphaeria lacustris*, *Dolichospermum spiroides*). Так, ранее численность и биомасса цианобактерий в летний период в среднем составляли  $456.4 \pm 417.8$  тыс.кл./л и  $0.016 \pm 0.01$  мг/л, соответственно, а в 2023 г. –  $1370.1 \pm 463.84$  тыс.кл./л и  $0.108 \pm 0.04$  мг/л, соответственно. Несмотря на то, что температура воды находится в пределах многолетней изменчивости, а показатели общего фосфора – на уровне олиготрофии, возможно на развитие летнего фитопланктона влияет комплекс различных факторов: хорошо прогреваемое мелководье с температурой поверхности воды до 21°C, слабая динамика водных масс, а также низкие значения соотношения  $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$ , которые позволяют активно развиваться цианобактериям. Выявление более точных причин увеличения микроводорослей в последние годы требует дополнительных исследований.

Для сообщества фитопланктона района о. Кижы характерен осенний пик развития фитопланктона, формирующийся не только диатомовыми водорослями (как для основной акватории Онежского озера), но и цианобактериями (Чекрыжева и Вислянская, 2000), что было отме-



чено в сентябре 2023 г. Из состава диатомовых водорослей в осенний период активно развивалась теплолюбивая диатомея – *Fragilaria crotonensis*, типичный представитель летнего комплекса фитопланктона Онежского озера (Чекрыжева, 2008; 2012; Трифонова, 1990), что связано с высоким для осени прогревом поверхности воды (до 14.6°C). Высокие количественные показатели отличались от ранних наблюдений состояния осеннего фитопланктона в 1994 году ( $V_{\text{общ}}$  0.70-2.00 мг/л;  $N_{\text{общ}}$  350-590 тыс. кл./л), однако, важно отметить, что данное наблюдение было проведено в середине октября, когда развитие фитопланктона уменьшается и подходит к зимнему состоянию.

Концентрации хлорофилла *a* в воде увеличивались от весны к осени, что возможно связано с увеличением мелкоклеточных более продуктивных форм водорослей (Гутельмахер, 1986), а также средне продуктивных диатомовых, численность которых изменялась от 482 тыс.кл./л (май) до 4415 тыс.кл./л (сентябрь).

## 5. Выводы

В районе о. Кижь Онежского озера в 2023 году было отмечено высокое видовое разнообразие микроводорослей во все сезоны наблюдений. В весенний и осенний периоды массово и количественно развивались диатомовые и цианобактерии, летом – цианобактерии, зеленые и золотистые водоросли. Было отмечено уменьшение концентрации кремния от весны к осени, что связано с активным увеличением диатомовых водорослей, а также снижение значений соотношения  $N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$ , что возможно повлияло на активное развитие цианобактерий. По количественным показателям фитопланктона, концентрации хлорофилла *a* и индексов сапробности, в 2023 году район о. Кижь Онежского озера, как и ранее, относился к мезотрофным участкам Онежского озера ( $\beta$ -мезосапробная зона, с 3 классом качества воды).

Полученные данные в целом сопоставимы с результатами предыдущих исследований. Исключением, являются высокие показатели развития фитопланктона в летний период, где возможной причиной увеличения цианобактерий является более высокий прогрев поверхностного слоя воды, а также соотношение биогенных элементов.

Таким образом, сформировавшиеся особые природные условия в районе Кижских шхер, характеризующиеся лучшим прогревом водных масс, замедленным водообменом с открытой частью озера, а также наличием антропогенной нагрузки, определяют более продуктивное развитие фитопланктона, в отличие глубоководных участков водоема. При усилении антропогенной нагрузки и потепления климата возможны более сильные изменения в фитоценозе исследованного района Онежского озера.

## 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

Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. 2017. В: Лозовик П.А., Ефременко Н.А. (ред.). СПб.: Нестор-История.

Барина 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.

Гецен М.В. 1985. Водоросли в экосистемах крайнего Севера. Л.: Наука.

Голубев А.И. 1999. Геологическое строение района заказника «Кижские шхеры». Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии» 1: 4–10.

ГОСТ 17.1.4.02–90. 1990. Госкомитет СССР по охране природы. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла *a*. М.: Издательство стандартов.

Гутельмахер Б.Л. 1986. Метаболизм планктона как единого целого: Трофометаболические взаимодействия зоо- и фитопланктона. Л.: Наука.

Дейнес Ю.Е. 2013. Геологическое строение острова Кижь 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.

Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. 2015. Многолетняя изменчивость температуры воды и ледовая фенология. В: Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, С. 38–44.

Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И. и др. 1951. Диатомовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 4. М.: Советская наука.

Ивантер Э.В., Коросов А.В. 2010. Элементарная биометрия: учебное пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ.

Калинкина Н.М., Теканова Е.В., Сярки М.Т. и др. 2023. Лимнологические показатели состояния Онежского озера и Выгозерского водохранилища: температура воды, концентрация хлорофилла *a*, 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. Кижь: 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.

Киселев И.А. 1954. Пировитовые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Вып. 6. М.: Советская наука.

Китаев С.П. 2007. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

Комулайнен С.Ф., Чекрыжева Т.А., Вислянская И.Г. 2006. Альгофлора озер и рек Карелии. Таксономический состав и экология. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

Лозовик П.А. 2013. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия. Водные ресурсы 40(6): 583–593.

Макушин А.В. 1974. Библиографический указатель по теме «Биологический анализ качества вод» с приложением списка организмов индикаторов загрязнения. Л.: Наука.

Матвиенко А.М. 1954. Золотистые водоросли. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 3. М.: Советская наука.

Методы гидробиологических исследований внутренних вод. 2024. В: Крылов А.В. (ред.). Борок: ИБВВ РАН.

Озера Карелии. Справочник. 2013. В: Филатов Н.Н., Кухарев В.И. (ред.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

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

Петрова Н.А. 1971. Фитопланктон Онежского озера. В: Растительный мир Онежского озера. Л.: Наука, С. 88–121.

Петрова Н.А. 1975. Фитопланктон литоральной зоны Онежского озера. В: Литоральная зона Онежского озера. Л.: Наука, С. 138–145.

ПНД Ф 14.1:2:3:4.279-14. 2014. Методика определения органического углерода и общего азота в питьевых, природных и сточных водах методом высокотемпературного окисления с использованием анализаторов углерода и азота.

Протасов Ю.Г. 1999. Некоторые актуальные вопросы антропогенного воздействия на территории охранной зоны музея-заповедника «Кижь». Труды Карельского научного центра РАН. Серия «Биогеография Карелии» 1: 126–131.

Рыжаков А.В., Зобкова М.В., Лозовик П.А. 2016. Особенности содержания и распределения форм фосфора в водоемах гумидной зоны. Труды Карельского научного центра РАН 9: 33–45.

Рыжаков А.В., Вапиров В.В., Степанова И.А. 2019. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии). Труды Карельского научного центра РАН 3: 52–60.

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

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: Карельский научный центр РАН, С. 29–40.

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. 2018. Гидрохимическая характеристика литоральной зоны Онежского озера. Водные ресурсы 45(2): 179–187.

Смирнова В.С. 2025. Трофическое состояние района Кижских шхер Онежского озера и оценка качества воды по показателям летнего фитопланктона. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 30–51. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-30](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-30)

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.

Трифонов И.С. 1990. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Л.: Наука.

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

Филатов Н.Н., Баклагин В.Н., Богданова М.С. и др. 2020. Диагноз и прогноз термогидродинамики и экосистем великих озер России. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН.

Хохлова Т.Ю., Семина О.В. 1988. Природа Кижских шхер. Петрозаводск: Карелия.

Чекрыжева Т.А., Вислянская И.Г. 2000. Фитопланктон. Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на территории Заонежского полуострова и северного приладожья. В: Оперативно-информационные материалы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, С. 167–175.

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

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

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.

Graham J.L., Jones J.R., Jones S.B. et al. 2004. Environmental factors influencing microcystin distribution and concentration in the Midwestern United States. *Water research* 38: 4395–4404.

Harris T.D., Smith V.H., Graham J.L. et al. 2016. Combined effects of nitrogen to phosphorus and nitrate to ammonia ratios on cyanobacterial metabolite concentrations in eutrophic Midwestern USA reservoirs. *Inland Waters* 6(2): 199–210.

Havens K.E., James R.T., East T.L. et al. 2003. N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental pollution* 122(3): 379–390.

Komárek J., Anagnostidis K. 1998. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (1). Cyanoprokaryota: Chroococcales. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag.

Komárek J., Anagnostidis K. 2005. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (2). Cyanoprokaryota: Oscillatoriales. Heidelberg: Elsevier, Spektrum.

Komárek J. 2013. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd. 19 (3). Cyanoprokaryota: Heterocytous. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

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

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bd 2 (3). Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag.

Martin-Jézéquel V., Hildebrand M., Brzezinski M.A. 2000. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth. *Journal of phycology* 36(5): 821–840.

Redfield A.C. 1934. On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *James Johnstone memorial volume* 1: 176–192.

Reynolds C.S. 2006. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press.

Sladeczek V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *Archivfür Hydrobiologie. Beiheft Ergebnisse der Limnologie* 7: 1–128.

Smith V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* 221: 669–671.

Tikkanen T. 1986. *Kasviplanktonopas*. SuomenLuonnonsuojelunTuki Oy. Helsinki: Forssa.

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