

Summer phytoplankton species composition and abundance in the southern basin of Lake Baikal and Irkutsk Reservoir

Firsova A.*, Galachyants Yu., Bessudova A., Mikhailov I., Titova L., Marchenkov A., Hilkanova D., Nalimova M., Buzevich V., Likhoshway Ye.

Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. Phytoplankton has higher species richness in summer, when water temperatures are higher than in other seasons in aquatic ecosystems. Here, we characterized phytoplankton communities using microscopy and environmental parameters (temperature, pH, transparency) in the southern basin of Lake Baikal and Irkutsk Reservoir, which is directly connected with the lake as it is the upper part of Angara River, the Lake Baikal outlet. Surface water temperature was 10.1-18.4 °C in the southern basin of Lake Baikal and 14.9-20.0 °C was in Irkutsk Reservoir, pH values were similar both in the lake and the reservoir (8.09-8.44 and 7.96-8.28, respectively), and Secchi disc water transparency was 4.5-9.0 m in the lake and 2.5-4.5 m in the reservoir. The phytoplankton community included 104 species from 7 high-rank taxa such as Chrysophyta (36), Chlorophyta (30), Bacillariophyta (22), Cyanobacteria (11), Cryptophyta (2), Dinophyta (2), and Haptophyta (1). Species composition of summer phytoplankton communities of the Irkutsk Reservoir and the southern basin of Lake Baikal were different, however the community composition in terms of high-level phylotypes was very similar. At the same time, a large number of small-cell cyanobacteria were identified in the lake. A high species richness of Chrysophyta, genus *Dinobryon* (11 species) and silica-scaled chrysophytes (22) was founded. The composition of dominant species of the southern basin of Lake Baikal and Irkutsk Reservoir became wider compared to data published earlier, and included *Cyanodictyon planctonicum*, *Cyanodictyon* sp., *Microcystis* sp., *Dinobryon sociale*, *Dinobryon sociale* var. *americanum*, *Chlorella vulgaris* and *Mychonastes homosphaera*.

Keywords: Lake Baikal, Irkutsk Reservoir, phytoplankton

1. Introduction

Phytoplankton is the basis of the food web in aquatic ecosystems and a sensitive indicator of environmental changes. During the formation of reservoirs, changes occur in the composition of its phytoplankton community (Shchur, 2009; Korneva, 2015; Nogueira et al., 2010; Mikhailov, 2020). The reservoir, located within the city, is under anthropogenic influence. Therefore, monitoring of its condition is very important. An increase in water temperature in the reservoir causes an increase in the diversity of summer phytoplankton species, including due to cyanobacteria and green microalgae (Vorobyova, 1995; Popovskaya and Firsova, 2005; Shchur, 2009; Popovskaya et al., 2012; Korneva, 2015; Mikhailov, 2020; Obertegger et al., 2022). Studies of the phytoplankton were carried out both before formation of the Irkutsk Reservoir, in Angara River (Yasnitsky, 1926), and after (Vasilyeva and

Kozhova, 1960; Vasilyeva and Kozhova, 1963; Kozhova, 1964; Vorobyova, 1981; 1985; 1995; Popovskaya et al., 2012). These studies show that the dominant composition of phytoplankton in the Irkutsk Reservoir depends on the phytoplankton of Lake Baikal. Recent studies conducted in June 2023 (Firsova et al., 2023; Bessudova et al., 2023b) showed that since the creation of the reservoir, there has been a slight increase in the species richness of the phytoplankton community. The main part of the dominant phytoplankton complex remained the same, and still depended on Baikal waters, however richness increased at the expense of other species. Additionally, communities sampled in June 2023 (Firsova et al., 2023), were shown to divide into two groups. One of the groups included all Baikal communities and the Burduguz sample of the Irkutsk Reservoir. All other phytoplankton communities from the Irkutsk Reservoir fell into the second group.

*Corresponding author.

E-mail address: adfir71@yandex.ru (A. Firsova)

Received: December 02, 2023; **Accepted:** December 12, 2023;
Available online: December 18, 2023

© Author(s) 2023. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



The Irkutsk Reservoir had the highest diversity of chrysophytes compared to other reservoirs of the Angara cascade, since it is the coldest and less trophic (Vorobyova, 1995). In summer, the temperature in the reservoir averaged 8.3–16.2 °C, species diversity increased, and biomass rarely exceeded 1 g/m³. As a rule, species of the genus *Dinobryon* Ehrenberg, *Asterionella formosa* Hassall, *Chroomonas acuta* Utermöhl, *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve & Möller, *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot & Simonsen dominate during this period.

In the second half of August, intensive bloom of *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter was previously observed (Vorobyova, 1995; Popovskaya et al., 2012). The purpose of this study is to determine the species composition, structure, abundance and biomass of summer phytoplankton in the southern basin of Lake Baikal and in the Irkutsk Reservoir.

2. Methods

Samples were collected in August 17–20, 2023, from the board of a research vessel “Papanin” at 9 stations in the southern basin of Lake Baikal (South Baikal) and at 8 stations in Irkutsk Reservoir, including bays (Fig. 1, Table 1), at the same stations as in June 2023 (Firsova et al., 2023). Water transparency (S) was measured with a Secchi disc. Water samples were collected with a 5 L Niskin bottle (Volta, Moscow, Russia). Water temperature, redox potential (Eh) and pH were measured with a pH-410 field device (Aquilon, Moscow, Russia) at each sampling depth. Values from each depth were then averaged and phytoplankton was studied by light and scanning electron microscopy as described previously (Bessudova et al., 2023b; Firsova et al., 2023).

Exploratory analysis of community composition was performed using R package *vegan* v.2.5-6 (Oksanen et al., 2022). For exploratory analyses, the phytoplankton species abundance and biomass data were transformed with the Hellinger procedure (Legendre and Gallagher, 2001). Environmental factors and summarized numerical values of biomass and abundance of phytoplankton were analyzed for collinearity. Pearson correlation coefficients and their *p*-values were computed for each pair of explanatory variables using R packages *rcorr* and *Hmisc*. The correlation matrix was visualized with R package *rcorr* using hierarchical clustering to group variables. Next, data on biomass and abundance of phytoplankton were excluded from the analysis, and environmental variables were centered and scaled to have zero means and standard deviations of one. This standardized environmental matrix was used for the constrained ordination of phytoplankton species abundance and biomass using redundancy analysis (RDA). Species presence/absence data was also analyzed by constrained correspondence analysis (CCA). Both forward selection and backward elimination approaches were tested to produce a model.

3. Results

3.1. Environmental parameters

In August 2023, environmental parameters of South Baikal and Irkutsk Reservoir changed (Table 1) relative to June 2023 (Firsova et al., 2023). Thus, in August, surface water temperature was 10.1–18.4 °C in the lake and 14.9–20.0 °C in the reservoir (3.6–5.0 °C and 6.0–12.7 °C in June, respectively). In August, pH values were similar both in the lake and the reservoir, 8.09–8.44 and 7.96–8.28, respectively, in contrast with June when water was higher in the reservoir (8.0 до 8.7) than in the lake (7.0–8.0). Water transparency in South Baikal decreased in August (4.5–9.0 m) compared to June (10–22 m), the same was for Irkutsk Reservoir (3.0–5.0 m in June, 2.5–4.5 m in August).

3.2. General characteristics of summer phytoplankton

We found in South Baikal and Irkutsk Reservoir in total 104 species from 7 high-rank taxa of phytoplankton (Fig. 2, Table 2). Chrysophyta (36 species) and Chlorophyta (30) had the highest species richness, compared with Bacillariophyta (22), Cyanobacteria (11), Cryptophyta (2) and Dinophyta (2), and Haptophyta (1).

The total abundance and biomass of phytoplankton in South Baikal varied significantly from 190×10^3 to 2779×10^3 cells/L and 26 to 427 mg/m³, respectively (Fig. 2). The highest abundance was recorded at St. 1 (12 km from Kultuk) due to a bloom of three small-cell species such as *Cyanodictyon planctonicum*, *Cyanodictyon* sp. и *Microcystis* sp., therefore, the total biomass did not exceed 107×10^3 cells/L despite the highest abundance. At St. 3, the highest biomass was determined by *Dinobryon* species. The total abundance and biomass of phytoplankton in Irkutsk Reservoir were lower than in South Baikal, 186×10^3 to 310×10^3 cells/L and 41 to 140 mg/m³, respectively (Fig. 3).

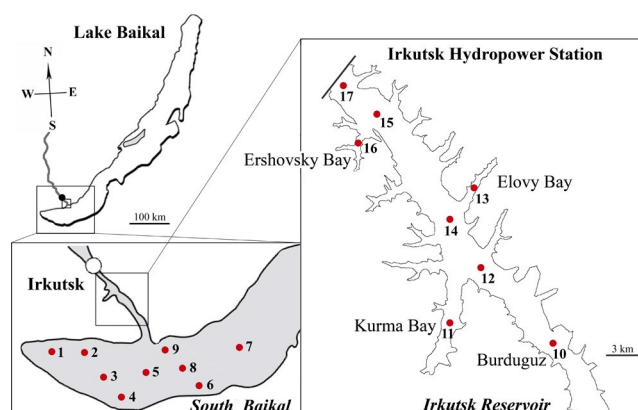


Fig.1. Sampling scheme.

Table 1. Sampling sites and environmental parameters in August 2023.

St. No.	Station Name	Date, dd.mm.yy	Coordinates N/E	Max depth, m	S, m	Eh	Depth, m	Water T, °C	pH
South Baikal									
1	12 km from Kultuk	17.08.23	51 ° 40.578' / 103 ° 52.309'	1252	6.5	-65,9	0	17.3	8.25
							5	17.3	8.37
							10	17.2	8.34
							15	17.0	8.33
							20	15.0	8.25
							25	10.0	8.44
2	3 km from Marituy	17.08.23	51 ° 45.546' / 104 ° 13.222'	1337	7.5	-66,0	0	16.9	8.33
							5	16.0	8.36
							10	15.2	8.30
							15	11.6	8.47
							20	7.7	8.50
							25	5.6	8.17
3	Marituy-Solzan	17.08.23	51 ° 38.710' / 104 ° 13.715'	1243	5.5	-72,6	0	17.5	8.40
							5	16.6	8.42
							10	10.3	8.85
							15	6.1	8.83
							20	5.0	8.25
							25	4.4	8.16
4	3 km from Solzan	17.08.23	51 ° 31.428' / 104 ° 14.417'	350	5.0	-68,2	0	18.4	8.44
							5	18.0	8.42
							10	17.3	8.36
							15	14.4	8.30
							20	12.1	8.44
							25	9.6	8.37
5	Cape Tolsty-Snezhnaya River	18.08.23	51 ° 36.402' / 104 ° 44.147'	1120	6.5	-19,5	0	16.0	8.26
							5	15.8	8.44
							10	13.9	8.57
							15	6.0	8.78
							20	5.0	8.34
							25	4.6	8.19
6	3 km from Tankhoi	18.08.23	51 ° 35.440' / 105 ° 06.968'	1402	8.5	-86,9	0	18.0	8.40
							5	17.7	8.40
							10	17.2	8.41
							15	16.7	8.07
							20	15.0	8.40
							25	13.0	8.43
7	Cape Kadilny-Mishikha	18.08.23	51 ° 46.731' / 105 ° 22.528'	1424	4.5	-58,4	0	17.7	8.37
							5	16.0	8.42
							10	12.5	8.34
							15	6.5	8.10
							20	5.7	8.00
							25	5.2	8.03

St. No.	Station Name	Date, dd.mm.yy	Coordinates N/E	Max depth, m	S, m	Eh	Depth, m	Water T, °C	pH
8	Listvyanka-Tankhoi	18.08.23	51 ° 42.262′/ 105 ° 00.720′	700	6.5	-39,5	0	17.4	8.29
							5	17.1	8.39
							10	15.8	8.32
							15	13.3	8.29
							20	10.5	8.27
							25	6.6	8.01
9	3 km from Listvyanka	18.08.23	51 ° 49.033′/ 104 ° 54.616′	1434	9.0	-46,5	0	10.1	8.09
							5	8.2	8.09
							10	5.9	8.06
							15	4.8	8.00
							20	4.6	7.93
							25	4.5	7.97
Irkutsk Reservoir									
10	Burduguz	19.08.23	52 ° 04.105′/ 104 ° 59.451′	15.5	4.5	-43,6	0	14.9	7.96
							5	10.5	7.96
							10	8.5	7.96
11	Kurma Bay	19.08.23	52 ° 06.845′/ 104 ° 45.926′	9.7	3.0	-58,6	0	18.7	8.12
							5	18.0	8.23
12	center against Kurma Bay	19.08.23	52 ° 10.874′/ 104 ° 47.935′	17	3.5	-58,2	0	17.7	8.16
							5	17.4	8.29
							10	14.9	8.19
13	Elovy Bay	19.08.23	52 ° 09.906′/ 104 ° 29.172′	10	2.5	-47,4	0	18.5	7.98
							5	16.4	8.03
14	center against Elovy Bay	19.08.23	52 ° 14.548′/ 104 ° 45.243′	25	3.5	-65,5	0	20.0	8.27
							5	18.5	8.42
							10	16.0	8.22
15	center against Ershovsky Bay	20.08.23	52 ° 21.511′/ 104 ° 37.550′	27	3.5	-55,8	0	18.0	8.13
							5	17.3	8.20
							10	16.4	8.13
16	Ershovsky Bay	20.08.23	52 ° 20.851′/ 104 ° 34.439′	16	3.0	-53,0	0	18.9	8.28
							5	17.9	8.08
							10	16.6	7.93
17	head water	20.08.23	52 ° 23.478′/ 104 ° 33.722′	25	3.5	-56,1	0	18.6	8.16
							5	17.6	8.25
							10	15.8	8.07

Table 2. Distribution of phytoplankton species in South Baikal and Irkutsk Reservoir in August 2023. “+” — the presence of this species. Species whose abundance exceeded 10, 50, 100 × 10³ cells/L are highlighted in colors corresponding. The color gradation is darker as the number increases. Station names in Fig. 1

Species	South Baikal									Irkutsk Reservoir							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cyanobacteria																	
<i>Anabaena</i> sp.																	+
<i>Aphanothece</i> sp.	+		+	+	+		+			+	+		+			+	
<i>Cyanodictyon</i> sp.	+			+									+				
<i>Cyanodictyon planctonicum</i> B.A. Mayer	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
<i>Dolichospermum flos-aquae</i> (Bornet & Flahault) P. Wacklin, L. Hoffmann & Komárek						+	+			+	+				+	+	+
<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Richter) P. Wacklin, L. Hoffmann & J. Komárek	+		+	+	+		+	+			+	+	+	+	+		+
<i>Dolichospermum scheremetieviae</i> (Elenkin) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek														+	+		
<i>Limnococcus limneticus</i> (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O. Komárek & Zapomelová						+											
<i>Microcystis</i> sp.	+	+	+	+	+							+					
<i>Microcystis pulverea</i> (H.C.Wood) Forti											+		+				
<i>Pseudanabaena galeata</i> Böcher				+								+					
Cryptophyta																	
<i>Komma caudata</i> (L. Geitler) D.R.A. Hill	+	+	+	+	+		+										
<i>Rhodomonas pusilla</i> (Bachmann) Javornický		+	+				+			+			+				
Dinophyta																	
<i>Ceratium hirundinella</i> (O.F. Müller) Dujardin				+						+	+	+		+		+	+
<i>Glenodinium</i> sp.	+		+	+		+	+			+							
Haptophyta																	
<i>Chrysochromulina parva</i> Lackey				+													
Chrysophyta																	
<i>Chrysosphaerella coronacircumspina</i> Wujek & Kristiansen	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Chrysosphaerella brevispina</i> Korshikov															+		
<i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof	+	+	+	+	+	+	+	+	+								
<i>Dinobryon crenulatum</i> West & G.S. West	+		+														
<i>Dinobryon cylindricum</i> O.E. Imhof		+	+	+	+	+	+										
<i>Dinobryon cylindricum</i> var. <i>palustre</i> Lemmermann		+	+			+											
<i>Dinobryon divergens</i> O.E. Imhof		+		+							+			+		+	+
<i>Dinobryon korshikovii</i> Matvienko ex Kapustin	+	+		+	+		+			+	+	+		+	+	+	+
<i>Dinobryon pediforme</i> (Lemmermann) Steinecke	+			+	+	+	+										
<i>Dinobryon sociale</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>americanum</i> (Brunnthal) Bachmann	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Dinobryon stipitatum</i> Stein	+		+		+	+											

Species	South Baikal									Irkutsk Reservoir							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Dinobryon suecicum</i> var. <i>longispinum</i> Lemmermann		+				+	+	+				+					
<i>Kephyrion</i> sp.					+												
<i>Kephyrion littorale</i> J.W.G. Lund	+			+	+		+	+									
<i>Kephyrion spirale</i> (Lackey) Conrad				+		+	+										
<i>Paraphysomonas gladiata</i> Preisig & Hibberd	+		+	+	+	+		+		+	+			+	+	+	+
<i>Paraphysomonas uniformis</i> subsp. <i>hemiradia</i> Scoble & Cavalier-Smith														+	+		+
<i>Paraphysomonas</i> sp.								+		+				+	+	+	
<i>Lepidochromonas butcheri</i> (Pennick & Clarke) Kapustin & Guiry																+	
<i>Spiniferomonas abrupta</i> Nielsen					+		+		+						+		
<i>Spiniferomonas cornuta</i> Balonov	+		+	+		+	+	+		+	+			+	+	+	
<i>Spiniferomonas bourrellyi</i> Takahashi	+		+	+		+		+		+		+	+		+	+	+
<i>Spiniferomonas takahashii</i> (Nicholls) Preisig & Hibberd				+			+	+		+	+	+			+		
<i>Spiniferomonas trioralis</i> (E. Takahashi) Preisig & Hibberd	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Spiniferomonas trioralis</i> f. <i>cuspidata</i> Balonov	+		+			+			+	+							
<i>Spiniferomonas septispina</i> Nicholls				+						+				+	+		
<i>Spiniferomonas silverensis</i> Nicholls											+			+	+	+	
<i>Mallomonas acaroides</i> Perty							+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Mallomonas alpina</i> Pascher & Ruttner		+		+		+		+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Mallomonas crassisquama</i> (Asmund) Fott											+						
<i>Mallomonas tonsurata</i> Teiling	+		+		+	+				+	+	+	+	+	+	+	
<i>Mallomonas vannigera</i> Asmund																+	
<i>Synura</i> sp. 1					+	+					+			+		+	
<i>Synura</i> sp. 2											+					+	
<i>Synura</i> cf. <i>glabra</i>											+		+	+	+		+
Bacillariophyta																	
<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Simonsen										+	+					+	+
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	+						+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aulacoseira baicalensis</i> (K.I. Meyer) Simonsen			+	+	+	+			+	+			+	+	+		+
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (O. Müller) Simonsen					+		+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen						+					+	+	+	+		+	+
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen										+					+	+	
<i>Cyclostephanos dubius</i> (Hustedt) Round	+		+	+	+		+	+		+	+			+	+	+	+
<i>Cyclostephanos makarovae</i> (S.I. Genkal) K. Schultz	+	+		+		+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
<i>Discostella pseudostelligera</i> (Hustedt) Houk & Klee				+			+	+		+	+	+	+	+	+	+	
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières										+	+	+		+	+	+	+
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton																+	
<i>Fragilaria radians</i> (Kützing) D.M. Williams & Round		+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Hannaea baicalensis</i> Genkal, Popovskaya & Kulikovskiy										+				+		+	+

Species	South Baikal									Irkutsk Reservoir							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Lindavia baicalensis</i> (Skvortsov & K.I.Meyer) Nakov, Guillory, M.L. Julius, E.C. Theriot & A.J. Alverson	+	+		+	+	+											
<i>Lindavia minuta</i> (Skvortsov) T. Nakov & al.	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Nitzschia graciliformis</i> Lange-Bertalot & Simonsen	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow										+						+	
<i>Stephanodiscus meyeri</i> Genkal & Popovskaya			+								+					+	+
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (Kützing) Cleve & Möller	+	+		+		+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Thalassiosira pseudonana</i> Hasle & Heimdal				+		+	+		+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Ulnaria acus</i> (Kützing) Aboal							+		+	+				+	+	+	
<i>Urosolenia eriensis</i> (H.L. Smith) Round & R.M. Crawford										+					+	+	
Chlorophyta																	
<i>Ankistrodesmus arcuatus</i> Korshikov	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chlamydomonas</i> sp.		+															
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck		+	+	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Coenococcus planctonicus</i> Korshikov	+	+	+	+	+	+	+	+				+	+				
<i>Coenocystis</i> sp.										+		+		+	+	+	+
<i>Desmodesmus abundans</i> (Kirchner) E.H. Hegewald	+				+												+
<i>Desmodesmus armatus</i> (Chodat) E.H. Hegewald											+						
<i>Desmodesmus bicaudatus</i> (Dedusenko) P.M. Tsarenko	+						+				+						
<i>Desmodesmus communis</i> (E. Hegewald) E. Hegewald	+									+	+	+		+		+	+
<i>Desmodesmus intermedius</i> (Chodat) E. Hegewald																+	+
<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> Nägeli					+												
<i>Elakatothrix genevensis</i> (Reverdin) Hindák	+		+			+	+	+		+	+		+	+	+	+	+
<i>Franceia ovalis</i> (Francé) Lemmermann												+					
<i>Kirchneriella lunaris</i> (Kirchner) Möbius						+	+				+			+	+	+	
<i>Koliella longiseta</i> (Vischer) Hindák	+		+							+	+		+	+		+	+
<i>Koliella variabilis</i> (Nygaard) Hindák	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+
<i>Lagerheimia genevensis</i> (Chodat) Chodat				+						+	+	+			+		+
<i>Monoraphidium circinale</i> (Nygaard) Nygaard	+	+	+	+													
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+
<i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+
<i>Monoraphidium minutum</i> (Nägeli) Komárková-Legnerová	+	+		+			+	+		+		+		+		+	+
<i>Mychonastes homosphaera</i> (Skuja) Kalina & Puncochárová	+	+	+	+	+	+	+	+	+								
<i>Pseudopediastrium</i> aff. <i>integrum</i> (Nägeli) M. Jena & C.Bock			+														
<i>Stauridium tetras</i> (Ehrenberg) E. Hegewald				+						+		+			+		

Species	South Baikal									Irkutsk Reservoir							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Scenedesmus</i> sp.	+						+						+				
<i>Scenedesmus ecornis</i> (Ehrenberg) Chodat	+		+		+	+	+	+		+		+		+	+		+
<i>Scenedesmus obtusus</i> Meyen														+			
<i>Sphaerocystis</i> sp.	+	+		+							+						
<i>Tetraëdron minimum</i> (A. Braun) Hansgirg							+					+					
<i>Tetraëdron trigonum</i> f. <i>gracile</i> (Reinsch) De Toni														+		+	
Total	45	32	37	48	35	39	44	31	21	50	50	40	29	48	47	55	46

Note:
Approximate concentration, $\times 10^3$ cells/L

Cyanobacteria	10	50	100
Chrysophyta	10	50	100
Bacillariophyta	10	+	+
Chlorophyta	10	50	+

3.3. Phytoplankton species composition of South Baikal

The species richness of phytoplankton at South Baikal varied within 21-48 species (Fig. 2, Table 2). Chrysophyta included 27 species and intraspecies of which 15 were silica-scaled chrysophytes. Chlorophyta included 24 species followed by diatoms (15), Cyanobacteria (8), Cryptophyta (2), Dinophyta (2), and Haptophyta (1) (Fig. 2, Table 2).

The most abundant were cyanobacteria such as *Cyanodictyon planctonicum* (840×10^3 cells/L at St. 1), *Microcystis* sp. (833×10^3 cells/L at St. 1), *Cyanodictyon* sp. (768×10^3 cells/L at St. 1) and *Dolichospermum lemmermannii* (25×10^3 cells/L at St. 1). As for large-cell chrysophycean species, *Dinobryon bavaricum* (109×10^3 cells/L at St. 4), *Dinobryon cylindricum* var. *palustre* (54×10^3 cells/L at St. 3), *Dinobryon sociale* (80×10^3 cells/L at St. 6), *Dinobryon sociale* var. *americanum* (93×10^3 cells/L at St. 3), *Dinobryon cylindricum* (27×10^3 cells/L at St. 3) (Figs 4, 5) played a prominent role. Among Chlorophyta, three species, *Ankistrodesmus arcuatus* (42×10^3 cells/L at St. 4), *Monoraphidium griffithii* (30×10^3 cells/L at St. 7) and *Mychonastes homosphaera* (42×10^3 cells/L at St. 4) prevailed both in abundance and biomass (Figs 4, 5). Bacillariophyta had a low abundance (less than 10×10^3 cells/L).

Warm-water diatom *Asterionella formosa* (12×10^3 cells/L) was only on St. 1 (Fig. 4).

3.4. Phytoplankton species composition of Irkutsk Reservoir

Phytoplankton species composition of Irkutsk Reservoir was similar to South Baikal, but its abundance is lower and its species richness is higher (29–50 species) (Fig. 2, Table 2). Chrysophyta included 27

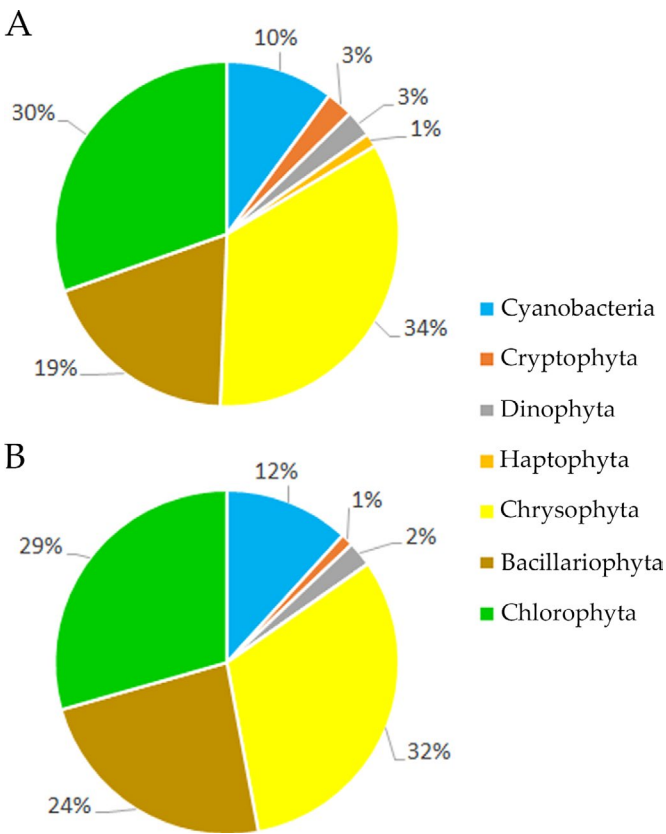


Fig.2. Relative abundance of high-rank phytoplankton taxa based on number of their species and intraspecies in South Baikal (A) and Irkutsk Reservoir (B) in August 2023.

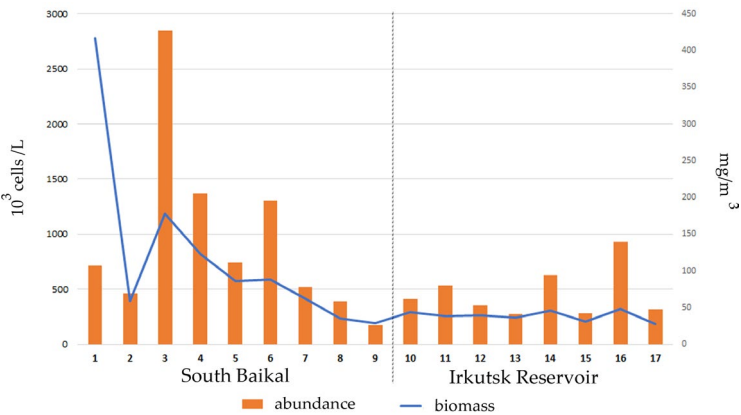


Fig.3. Distribution of phytoplankton abundance and biomass in South Baikal and Irkutsk Reservoir in August 2023.

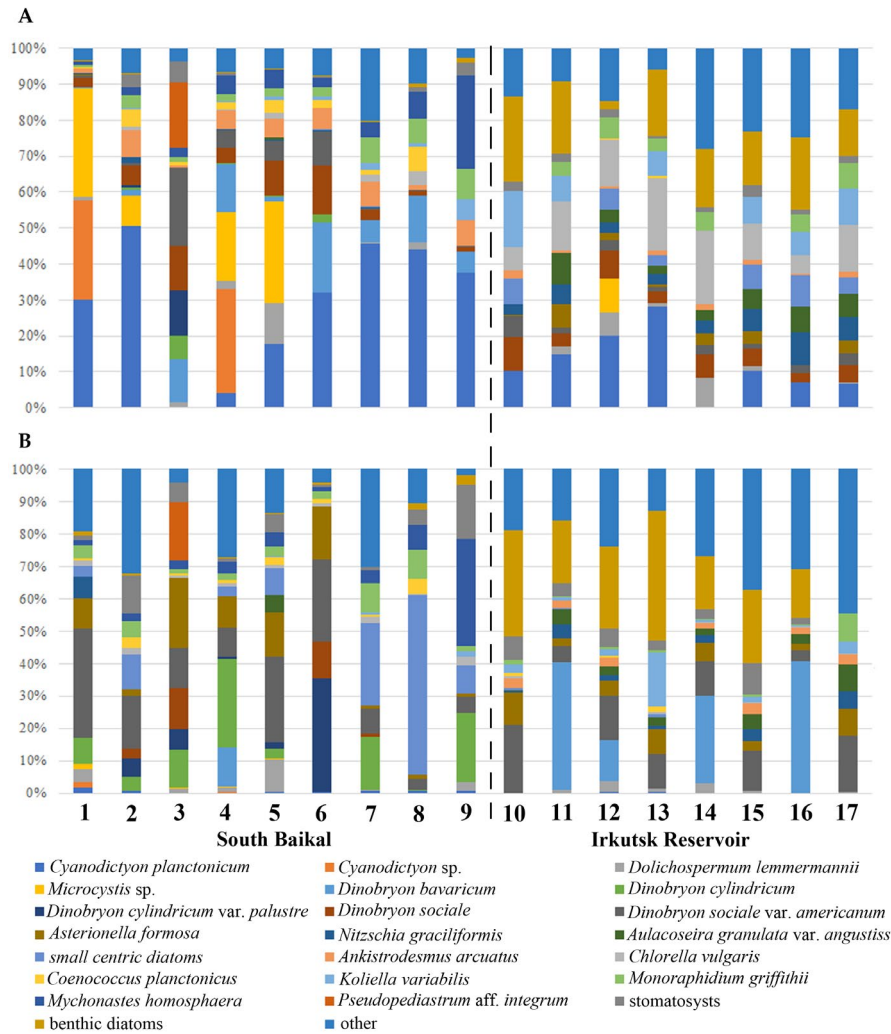


Fig.4. Distribution of relative abundance (A) and relative biomass (B) of dominant phytoplankton species in South Baikal and Irkutsk Reservoir in August 2023.

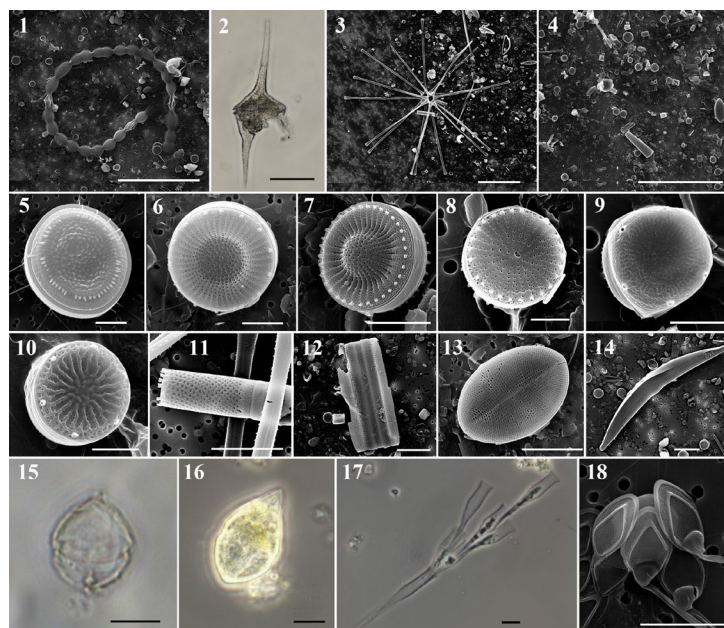


Fig.5. Representatives of phytoplankton in South Baikal and Irkutsk Reservoir: 1 – *Dolichospermum flos-aquae*; 2 – *Ceratium hirundinella*; 3 – *Asterionella formosa*; 4 – general view of a sample from Irkutsk Reservoir (in front of Elovoy Bay); 5 – *Lindavia minuta*; 6 – *Cyclostephanos dubius*; 7 – *Cyclostephanos makarovae*; 8 – *Stephanodiscus minutulus*; 9 – *Thalassiosira pseudonana*; 10 – *Discostella pseudostelligera*; 11 – *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*; 12 – *Fragilaria capucina*; 13 – *Cocconeis placentula*; 14 – *Hannaea baicalensis*; 15 – *Peridinium* sp.; 16 – *Gyrodinium helveticum*; 17 – *Dinobryon bavaricum*; 18 – *Mallomonas alpina*. Scale bars: 1, 3, 4 – 50 μ m; 2, 12, 14–17 – 10 μ m; 5–7, 11, 13, 18 – 5 μ m; 8–10 – 2 μ m.

species and intraspecies, as in lake, with prevalence of silica-scaled chrysophytes (22 species). Cyanobacteria such as *Cyanodictyon planctonicum* (42×10^3 cells/L at St. 12), *Microcystis* sp. (20×10^3 cells/L at St. 12), *Dolichospermum lemmermannii* (25×10^3 cells/L at St. 14), green algae such as *Chlorella vulgaris* (59×10^3 cells/L at St. 14), *Koliella longiseta* (41×10^3 cells/L at St. 10) and *Monoraphidium griffithii* (15×10^3 cells/L at St. 14) were the most abundant as well as in Lake Baikal. The abundance of large-cell species significantly decreased, only *Dinobryon sociale* (24×10^3 cells/L at St. 10) and *Dinobryon sociale* var. *americanum* (16×10^3 cells/L at St. 10) was dominant. Among Bacillariophyta, *Asterionella formosa* (10×10^3 cells/L at St. 14), *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (11×10^3 cells/L at St. 15) and *Nitzschia graciliformis* (13×10^3 cells/L at St. 15) had low abundances. Small centric species such as *Cyclostephanos makarovae*, *Stephanodiscus minutulus*, *Cyclostephanos makarovae*, *Discostella pseudostelligera* and *Thalassiosira pseudonana* also had low abundances. Their highest abundance of 19×10^3 cells/L was at St. 10 (Figs 4, 5).

3.5. Phytoplankton species composition of Irkutsk Reservoir bays

Phytoplankton species composition of the bays and the central part of Irkutsk Reservoir was similar. Benthic diatoms had large abundance ($45\text{--}64 \times 10^3$ cells/L in the bays due to their shallowness. The total abundance and biomass varied between 242×10^3 and 321×10^3 cells/L, 41 and 140 mg/m³, respectively (Fig. 3). The highest species richness was in Ershovsky Bay (St. 16) (55 species) due to diatoms (19) and silica-scaled chrysophytes (18). In Kurma Bay (St. 11) 50 species were identified, and in Elovoy Bay (St. 13), there were 29 (Fig. 2, Table 2). Cyanobacteria *Cyanodictyon planctonicum* ($22\text{--}68 \times 10^3$ cells/L) and chlorophyte *Chlorella vulgaris* ($16\text{--}48 \times 10^3$ cells/L) prevailed in all three bays. The dominating species included diatoms *Nitzschia graciliformis* (up to 29×10^3 cells/L), *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (up to 23×10^3 cells/L) and small centric species (up to 28×10^3 cells/L), among which *Stephanodiscus minutulus* and *Thalassiosira pseudonana* were the most abundant. Microphotographs of summer phytoplankton species are shown in Fig. 5.

3.6. Comparison of phytoplankton communities and impact of environmental factors

South Baikal and Irkutsk Reservoir communities clearly split into two groups as revealed by exploratory analysis (Fig. 6). Importantly, similar patterns were obtained using all three types of community composition data: species abundance, species biomass and presence/absence matrices (Fig. 6A-C). Explanatory power was the highest for RDA-based model inferred from species abundance data (Fig. 5A), its adjusted R² was as high as 31%. This model included two environmental variables, namely water transparency and pH, acting

in similar direction. Explanatory power of the models generated from species biomass (Fig. 6B) and presence/absence (Fig. 6C) data were 19% and 9%, respectively. In this case, models retained single environmental factor, water transparency.

There was good positive correlation of abundance and biomass of small centric and benthic diatoms (Fig. 6D). Additionally, abundance and biomass of stomatocysts had also prominent positive correlation with total biomass. Considering hydrophysical/chemical parameters, water transparency and pH had negative impact to abundance and biomass of small centric and benthic diatoms. Water transparency and temperature were also negatively correlated.

4. Discussion

Our study showed that in summer, surface water temperatures in South Baikal and Irkutsk Reservoir were similar compared to June 2023 (Firsova et al., 2023). The composition of dominant species of Irkutsk Reservoir and South Baikal phytoplankton communities were similar (Fig. 2, Table 2). However, similarly with June 2023, the community composition revealed significant differences between South Baikal and Irkutsk Reservoir (Fig. 6A-C). The main indicator of this effect was revealed to be such simple hydrophysical parameter as water transparency, that was significantly decreased at Irkutsk Reservoir station. The only intriguing difference between the results of exploratory analyses of the June and August phytoplankton assemblages was the shift of the Burduguz community to the group of Irkutsk Reservoir samples (Firsova et al., 2023). This effect can be explained by the move of the Baikal/Reservoir transition upstream Angara in late summer. In summer, an increase of surface water temperature (Table 1) promotes the growth of warm-water phytoplankton species in both South Baikal and Irkutsk Reservoir. Small-cell colonial cyanobacteria dominated at all stations. Among these cyanobacteria, *Cyanodictyon planctonicum* had the highest abundance in South Baikal at St. 1 near Kultuk. We found that the abundance and biomass of summer phytoplankton in the Irkutsk Reservoir were low, which is similar to the results of previous studies (Vorobyova, 1995; Popovskaya et al., 2012). As in previous years (Vorobyova, 1995; Popovskaya et al., 2012), the dominant species included the cyanobacterium *Dolichospermum lemmermannii* and its abundance was below 25×10^3 cells/L. Whereas, in the second half of August and early September 1985, the number of *Dolichospermum lemmermannii* cells reached 7.2×10^6 cells/L (Vorobyova, 1995). *Nitzschia graciliformis* dominated the South Baikal and Irkutsk Reservoir in June 2023 (Firsova et al., 2023). In August 2023, this species remained one of the dominant ones (Figure 3), but its numbers decreased significantly compared to June.

The dominant species of summer phytoplankton identified in our study were similar to previous studies of the 60s and 80s (Vorobyova, 1995), and of 2008 (Popovskaya et al., 2012), which indicates the stability of the species composition. Compared to

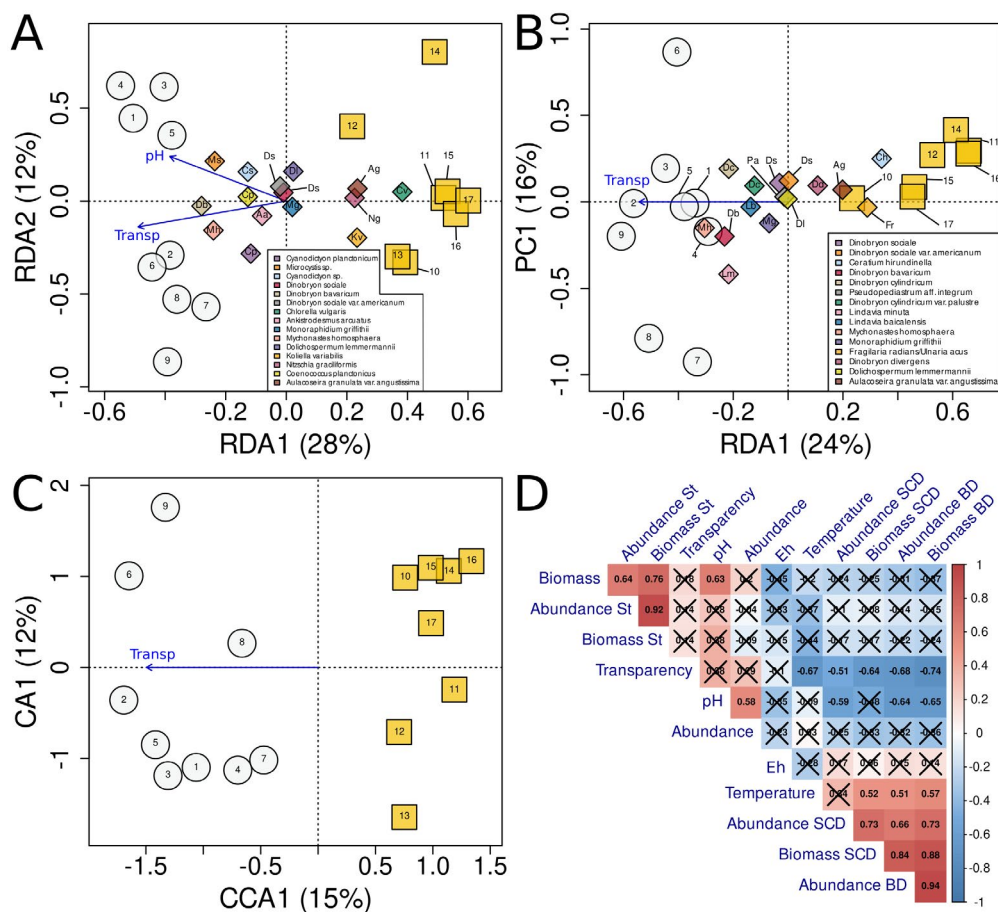


Fig.6. Correlation of environmental parameters and constrained ordination of species abundance, biomass, and presence/absence data. (A) – Redundancy analysis of species abundance; (B) – Redundancy analysis of species biomass; (C) – Constrained correspondence analysis of species presence/absence; Gray circles – sampling sites in the south basin of Lake Baikal. Yellow squares – sampling sites across the Irkutsk water reservoir. Diamonds – top-15 dominant phytoplankton species. Blue arrows – explanatory variables, used in the model. (D) – Analysis of correlation of environmental parameters and summary numerical variables. Values are Pearson correlation coefficients with the color legend on the right. Strikeout cells are non-significant correlations ($p > 0.05$). Hydrophysical and hydrochemical parameters (water transparency, water temperature, pH, and redox potential) were used as explanatory matrix in constrained ordination analysis. BD – benthic diatoms, SCD – small centric diatoms, St – stomatocysts.

previous studies (Kozhova, 1964; Vorobyova, 1995; Popovskaya et al., 2012), some changes have occurred: the phytoplankton species richness and the number of dominant species have increased. *Chlorella vulgaris* and *Mychonastes homosphaera* are the most abundant among Chlorophyta, while *Dinobryon sociale* prevails among Chrysophyta. The high Chrysophyta richness of the Irkutsk Reservoir has already been reported as it is the coldest and has the lowest nutrient concentrations among other reservoirs in the Angara Cascade (Vorobyova, 1995; Bessudova et al., 2023b). We noted a high richness of species of the genus *Dinobryon* (11 taxa) in South Baikal, including taxa not described here earlier such as *Dinobryon crenulatum* and *Dinobryon suecicum* var. *longispinum*. These species were likely brought into the Lake from tributaries, and bloomed in South Baikal due to more favorable conditions such as high water transparency, lack of currents and low abundance of diatoms competing Chrysophytes for silicon. It was previously shown that such factors play an important role to increase the diversity of Chrysophytes in the Gulf of the Ob River (Bessudova et al., 2023a). The species composition was also enriched with dominating species *Dinobryon sociale* and *Dinobryon sociale* var.

americanum. The species composition of silica-scaled chrysophytes changed in regard to the vernal complex of species (Bessudova et al., 2023b), being enriched with species typical of warmer waters (Bessudova et al., 2021) such as *Paraphysomonas gladiata*, *Paraphysomonas uniformis* subsp. *hemiradia*, *Lepidochromonas butcheri*, *Spiniferomonas septispina*.

5. Conclusion

Despite the similar environmental parameters such as water temperature and pH as well as high number of common taxa, the total abundance and biomass of summer phytoplankton were higher in the southern basin of Baikal than in Irkutsk Reservoir. There were discrepancies in the species composition and in the list of dominant species. Cyanobacteria bloomed in South Baikal, although their growth in Irkutsk Reservoir was limited. Concerning previous studies, including that of June 2023, the overall richness increased due to Chrysophyta species. The total abundance and biomass of phytoplankton corresponded to summer periods of the previous years.

Acknowledgements

We are very thankful to the team of a research vessel “Papanin” for well-coordinated work. Microscopy studies were performed at the Electron Microscopy Center of the Shared Research Facilities “Ultramicroanalysis” of the Limnological Institute, <https://www.lin.irk.ru/copp/>. This work was performed with financial support from the Russian Science Foundation, project No. 23-14-00028, <https://rscf.ru/en/project/23-14-00028/>.

Conflict of interests

The authors hereby state that this research work and manuscript production complied with ethical standards, and none of the authors have any potential conflict of interests. We further declare that this research was not funded by any agency except RSF.

References

- Bessudova A.Yu., Gabyshev V.A., Firsova A.D. et al. 2021. Diversity of silica-scaled chrysophytes and physicochemical parameters of their environment in the estuaries of rivers in the Arctic watershed of Yakutia, Russia. *Sustainability* 13(24): 13768. DOI: [10.3390/su132413768](https://doi.org/10.3390/su132413768)
- Bessudova A., Likhoshway Y., Firsova A. et al. 2023. Small Organisms in a Large River: What Provides the High Diversity of Scaled Chrysophytes in the Ob River? *Water* 15(17): 1-29. DOI: [10.3390/w15173054](https://doi.org/10.3390/w15173054)
- Bessudova A.Y., Galachyants Y., Firsova A.D. et al. 2023. Changes in diversity of silica-scaled Chrysophytes during lake–river–reservoir transition (Baikal–Angara–Irkutsk Reservoir). *Life* 13(10): 1-17. DOI: [10.3390/life13102052](https://doi.org/10.3390/life13102052)
- Firsova A.D., Galachyants Y.P., Bessudova A.Y. et al. 2023. Environmental factors affecting distribution and diversity of phytoplankton in the Irkutsk Reservoir ecosystem in June 2023. *Diversity* 15(10): 1-20. DOI: [10.3390/d15101070](https://doi.org/10.3390/d15101070)
- Kozhova O.M. 1964. *Phytoplankton of the Irkutsk Reservoir*. Moscow: Science. (in Russian)
- Korneva L.G. 2015. *Phytoplankton of reservoirs of the Volga Basin*. Kostroma: Kostroma Printing House. (in Russian)
- Legendre P., Gallagher E.D. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129: 271-280. DOI: [10.1007/s004420100716](https://doi.org/10.1007/s004420100716)
- Mikhailov V.V. 2020. Assessment of the current ecological state of the Novosibirsk Reservoir by indicators of phytoplankton development. Cand. Sci. Dissertation, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia. (in Russian)
- Nogueira M.G., Ferrareze M., Moreira M.L. et al. 2010. Phytoplankton assemblages in a reservoir cascade of a large tropical – subtropical river (SE, Brazil). *Brazilian Journal of Medical and Biological Research* 70(3): 781-793.
- Obertegger U., Flaim G., Corradini S. et al. 2022. Multi-annual comparisons of summer and under-ice phytoplankton communities of a mountain lake. *Hydrobiologia* 849: 4613-4635. DOI: [10.1007/s10750-022-04952-3](https://doi.org/10.1007/s10750-022-04952-3)
- Oksanen J., Simpson G.L., Blanchet G.F. et al. 2022. *Vegan: Community Ecology Package*. R Package Version 2.5-6. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Popovskaya G.I., Firsova A.D. 2005. Phytoplankton of the Kharanor Reservoir. In: Kirillov V.V. (Ed.), *The cooling reservoir of the Kharanorskaya GRES and its life*. Novosibirsk, pp. 58-71. (in Russian)
- Popovskaya G.I., Firsova A.D., Bessudova A.Yu. et al. 2012. Phytoplankton of the Irkutsk Reservoir as an indicator of water quality. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 41(2): 29-38. DOI: [10.2478/s13545-012-0014-2](https://doi.org/10.2478/s13545-012-0014-2)
- Shchur L.A. 2009. Phytoplankton as an indicator of the state of the ecosystem of the cooling reservoir of Berezovskaya GRES-1 (Krasnoyarsk Territory). *Water Resources* 36(5): 597-605. (in Russian)
- Vasilyeva G.L., Kozhova O.M. 1960. Some data on the bacterio-, phyto- and zooplankton of the Irkutsk Reservoir during the years of its formation (1957-1958). *Bulletin. Institute of Reservoir Biology* 8-9: 6-8. (in Russian)
- Vasilyeva G.L., Kozhova O.M. 1963. *Plankton of the Irkutsk Reservoir*. Trudy VGO 13: 25-55. (in Russian)
- Vorobyova S.S. 1981. *Phytoplankton of the Angara reservoirs. Cycle of matter and energy in reservoirs 1*: 50-52. (in Russian)
- Vorobyova S.S. 1985. *Interannual changes in phytoplankton in the Angara reservoirs. Cycle of matter and energy in reservoirs 2*: 20-22. (in Russian)
- Vorobyova S.S. 1995. *Phytoplankton of Angara Reservoirs*. Novosibirsk: Siberian publishing company “Nauka”. (in Russian)
- Yasnitsky V.N. 1926. *Materials for the knowledge of rivers of the Irkutsk region*. *Izvestiya Vostochno-Sibirskogo Otdela Imperatorskogo Russkogo Geograficheskogo Obshchestva* 9(2): 104-114. (in Russian)

Видовой состав, численность и биомасса летнего фитопланктона южной котловины оз. Байкал и Иркутского водохранилища

Фирсова А.*, Галачянц Ю., Бессудова А., Михайлов И., Титова Л.,
Марченков А., Хилханова Д., Налимова М., Бузевич В., Лихошвай Е.

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Фитопланктон в водных экосистемах имеет более высокое видовое богатство летом, когда температура воды выше, чем в другие сезоны года. Охарактеризовано сообщество фитопланктона с помощью микроскопии и определены параметры воды (температура, pH, прозрачность) в южной котловине озера Байкал и Иркутском водохранилище. Температура поверхностных вод в южной котловине озера Байкал составляла 10,1-18,4 °С, в Иркутском водохранилище 14,9-20,0 °С. Значения pH как в озере, так и в водохранилище были сходными (8,09-8,44 и 7,96-8,28 соответственно), а прозрачность воды по диску Секки составляла 4,5-9,0 м в озере и 2,5-4,5 м в водохранилище. Сообщество фитопланктона включало 104 вида из 7 таксонов высокого ранга, таких как Chrysophyta (36), Chlorophyta (30), Bacillariophyta (22), Cyanobacteria (11), Cryptophyta (2), Dinophyta (2) и Haptophyta (1). Видовой состав летних сообществ фитопланктона Иркутского водохранилища и южной котловины оз. Байкал различался, однако состав сообществ по филотипам высокого уровня был весьма сходным. Так, в озере выявлено более высокая численность мелкоклеточных цианобактерий. Обнаружено высокое видовое богатство Chrysophyta, рода *Dinobryon* (11 видов) и кремнистых чешуйчатых хризифитовых (22). Состав доминирующих видов южной котловины оз. Байкал и Иркутского водохранилища стал шире по сравнению с опубликованными ранее данными и включил *Cyanodictyon planctonicum*, *Cyanodictyon* sp., *Microcystis* sp., *Dinobryon sociale*, *Dinobryon sociale* var. *americanum*, *Chlorella vulgaris* и *Mychonastes homosphaera*.

Ключевые слова: озеро Байкал, Иркутское водохранилище, фитопланктон

1. Введение

Фитопланктон является основой пищевой сети водных экосистем и чувствительным индикатором изменений окружающей среды. В процессе формирования водохранилища происходят изменения в составе фитопланктонного сообщества (Щур, 2009; Корнева, 2015; Nogueira et al., 2010; Михайлов, 2020). Водохранилище, расположенное в черте города, находится под антропогенным воздействием, поэтому очень важно следить за его состоянием. Повышение температуры воды в водохранилищах вызывает увеличение разнообразия более теплолюбивых видов фитопланктона, в том числе за счет цианобактерий и зеленых микродорослей (Воробьева, 1995; Поповская и Фирсова, 2005; Щур, 2009; Popovskaya et al., 2012; Корнева, 2015; Михайлов, 2020; Obertegger et al., 2022).

Исследования фитопланктона проводились в реке Ангара до образования Иркутского водохранилища (Ясницкий, 1926), так и после (Васильева и Кожова, 1960; Васильева и Кожова, 1963; Кожова, 1964; Воробьева, 1981; 1985; 1995; Popovskaya et al., 2012). Эти исследования показали, что доминирующий состав фитопланктона Иркутского водохранилища зависит от фитопланктона озера Байкал. Недавние исследования, проведенные в июне 2023 г. (Firsova et al., 2023; Bessudova et al., 2023b), показали, что с момента создания водоема произошло некоторое увеличение видового богатства фитопланктона. Основная часть доминирующего комплекса фитопланктона осталась прежней и по-прежнему зависела от байкальских вод, однако богатство увеличилось за счет других видов. Кроме того, при анализе проб, отобранных в июне 2023 г. (Firsova et al., 2023) было показано, что по составу

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: adfir71@yandex.ru (А.Д. Фирсова)

Поступила: 02 декабря 2023; Принята: 12 декабря 2023;
Опубликована online: 18 декабря 2023

© Автор(ы) 2023. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



сообщества фитопланктона делятся на две группы. В одну из групп входят все байкальские сообщества и проба Бурдугуз Иркутского водохранилища. Во вторую группу попадают все остальные пробы Иркутского водохранилища. Иркутское водохранилище отличалось наибольшим разнообразием Chrysophyta по сравнению с другими водоемами Ангарского каскада, поскольку оно наиболее холодное и менее трофное (Воробьева, 1995). Летом температура в водоеме составляла в среднем 8,3–16,2 °C, видовое разнообразие увеличивалось, биомасса редко превышала 1 г/м³. Как правило, в этот период доминировали виды рода *Dinobryon* Ehrenberg, *Asterionella formosa* Hassall, *Chroomonas acuta* Utermöhl, *Stephanodiscus minutulus* (Kützinger) Cleve & Möller, *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot & Simonsen. Во второй половине августа наблюдалось интенсивное развитие *Anabaena lemmermannii* P.G. Richter (Воробьева, 1995; Popovskaya et al., 2012).

Цель работы – определение видового состава, структуры, численности и биомассы летнего фитопланктона Южной котловины оз. Байкал и Иркутского водохранилища.

2. Методы

Пробы были отобраны 17–20 августа 2023 г. с борта научно-исследовательского судна «Папанин» на 9 станциях в южной котловине оз. Байкал (Южный Байкал) и на 8 станциях Иркутского водохранилища, включая заливы (Рис.1, Таблица 1), на тех же станциях, что и в июне 2023 г. (Фирсова и др., 2023). Прозрачность воды (S) измеряли с помощью диска Секки. Пробы воды отбирали батометром Нискина емкостью 5 л («Вольта», Москва, Россия). Температуру, ОВП и pH воды измеряли полевым прибором pH-410 («Аквилон», Москва, Россия) на каждой глубине отбора проб. Затем пробы с каждой глубины усредняли и фитопланктон изучали методами световой и сканирующей электронной микроскопии, как описано ранее (Фирсова et al., 2023; Bessudova et al., 2023b).

Поисковый анализ состава сообществ проводили с использованием языка программирования R и пакета *vegan* v.2.5-6 (Oksanen et al., 2022). Для разведочного анализа данные о численности видов и биомассе фитопланктона были преобразованы с помощью процедуры Хеллингера (Legendre and Gallagher, 2001). Факторы окружающей среды и суммарные значения биомассы и численности фитопланктона были проанализированы на предмет коллинеарности. Коэффициенты корреляции Пирсона и их *p*-значения были рассчитаны для каждой пары объясняющих переменных с использованием пакетов *R* *corr* и *Hmisc*. Корреляционную матрицу визуализировали с помощью пакета *Rcorr* с использованием иерархической кластеризации для группировки переменных. Затем данные о биомассе и численности фитопланктона были исключены из анализа, а переменные окружающей среды были центрированы и масштабированы так, чтобы иметь нулевое среднее значение и стандартное откло-

нение, равное единице. Эта стандартизированная матрица окружающей среды использовалась для ограниченной ординации численности и биомассы видов фитопланктона путем анализа избыточности (RDA). Данные о присутствии/отсутствии видов также анализировали с помощью ограниченного анализа соответствия (CCA). Для создания модели были протестированы подходы как прямого отбора, так и обратного исключения объясняющих переменных.

3. Результаты

3.1. Параметры водной среды

В августе 2023 г. экологические параметры Южного Байкала и Иркутского водохранилища изменились (Таблица 1) относительно июня 2023 г. (Фирсова et al., 2023). Так, в августе температура поверхностных вод составляла 10,1–18,4 °C в озере и 14,9–20,0 °C в водохранилище (3,6–5,0 °C и 6,0–12,7 °C в июне соответственно). В августе значения pH как в озере, так и в водохранилище были сходными – 8,09–8,44 и 7,96–8,28 соответственно, в отличие от июня, когда значения pH воды в водохранилище были выше (8,0–8,7), чем в озере (7,0–8,0). Прозрачность воды по диску Секки в Южном Байкале существенно снизилась в августе (4,5–9,0 м) по сравнению с июнем (10–22 м), то же самое отмечено и в Иркутском водохранилище (3,0–5,0 м в июне, 2,5–4,5 м в августе).

3.2. Общая характеристика летнего фитопланктона

В Южном Байкале и Иркутском водохранилище нами обнаружено всего 104 вида из 7 отделов (Рис.2, Таблица 2). Наибольшее видовое богатство имели Chrysophyta (36 видов) и Chlorophyta (30) по сравнению с Bacillariophyta (22), Cyanobacteria (11), Cryptophyta (2), Dinophyta (2) и Nartophyta (1).

Общая численность и биомасса фитопланктона Южного Байкала существенно варьировали от 190×10^3 до 2779×10^3 кл./л и от 26 до 427 мг/м³ соответственно (Рис.3). Наибольшая численность отмечена на ст. 1 (12 км от Култук) за счет цветения трех мелкоклоточных видов: *Cyanodictyon*

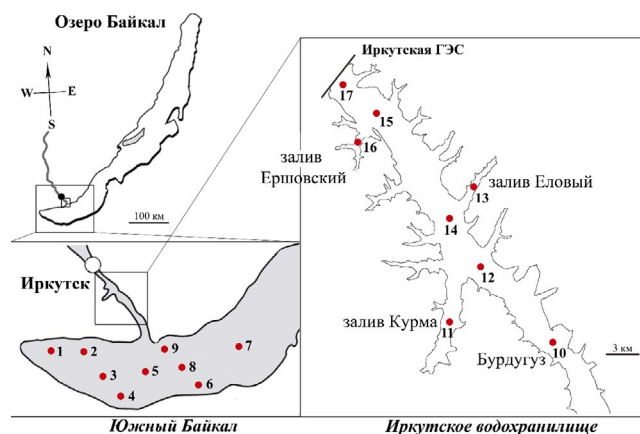


Рис.1. Схема отбора проб.

Таблица 1. Места отбора проб и параметры окружающей среды в августе 2023.

№	Название станции	Дата	Координаты N/E	Максимальная глубина, м	S, m	ОВП	Глубина, м	Т воды, °C	pH
Южный Байкал									
1	12 км от Култука	17.08.23	51 ° 40.578' / 103 ° 52.309'	1252	6.5	-65,9	0	17.3	8.25
							5	17.3	8.37
							10	17.2	8.34
							15	17.0	8.33
							20	15.0	8.25
							25	10.0	8.44
2	3 км от Маритуя	17.08.23	51 ° 45.546' / 104 ° 13.222'	1337	7.5	-66,0	0	16.9	8.33
							5	16.0	8.36
							10	15.2	8.30
							15	11.6	8.47
							20	7.7	8.50
							25	5.6	8.17
3	Маритуй-Солзан	17.08.23	51 ° 38.710' / 104 ° 13.715'	1243	5.5	-72,6	0	17.5	8.40
							5	16.6	8.42
							10	10.3	8.85
							15	6.1	8.83
							20	5.0	8.25
							25	4.4	8.16
4	3 км от Солзана	17.08.23	51 ° 31.428' / 104 ° 14.417'	350	5.0	-68,2	0	18.4	8.44
							5	18.0	8.42
							10	17.3	8.36
							15	14.4	8.30
							20	12.1	8.44
							25	9.6	8.37
5	Мыс Толстый-р. Снежная	18.08.23	51 ° 36.402' / 104 ° 44.147'	1120	6.5	-19,5	0	16.0	8.26
							5	15.8	8.44
							10	13.9	8.57
							15	6.0	8.78
							20	5.0	8.34
							25	4.6	8.19
6	3 км от Танхоя	18.08.23	51 ° 35.440' / 105 ° 06.968'	1402	8.5	-86,9	0	18.0	8.40
							5	17.7	8.40
							10	17.2	8.41
							15	16.7	8.07
							20	15.0	8.40
							25	13.0	8.43
7	Мыс Кадильный- Мишиха	18.08.23	51 ° 46.731' / 105 ° 22.528'	1424	4.5	-58,4	0	17.7	8.37
							5	16.0	8.42
							10	12.5	8.34
							15	6.5	8.10
							20	5.7	8.00
							25	5.2	8.03

№	Название станции	Дата	Координаты N/E	Максимальная глубина, м	S, m	ОВП	Глубина, м	Т воды, °C	pH
8	Листвянка-Танхой	18.08.23	51 ° 42.262′/ 105 ° 00.720′	700	6.5	-39,5	0	17.4	8.29
							5	17.1	8.39
							10	15.8	8.32
							15	13.3	8.29
							20	10.5	8.27
							25	6.6	8.01
9	3 км от Листвянки	18.08.23	51 ° 49.033′/ 104 ° 54.616′	1434	9.0	-46,5	0	10.1	8.09
							5	8.2	8.09
							10	5.9	8.06
							15	4.8	8.00
							20	4.6	7.93
							25	4.5	7.97
Иркутское водохранилище									
10	Бурдугуз	19.08.23	52 ° 04.105′/ 104 ° 59.451′	15.5	4.5	-43,6	0	14.9	7.96
							5	10.5	7.96
							10	8.5	7.96
11	залив Курма	19.08.23	52 ° 06.845′/ 104 ° 45.926′	9.7	3.0	-58,6	0	18.7	8.12
							5	18.0	8.23
12	центр напротив залива	19.08.23	52 ° 10.874′/ 104 ° 47.935′	17	3.5	-58,2	0	17.7	8.16
							5	17.4	8.29
							10	14.9	8.19
13	залив Еловый	19.08.23	52 ° 09.906′/ 104 ° 29.172′	10	2.5	-47,4	0	18.5	7.98
							5	16.4	8.03
14	центр напротив залива Еловый	19.08.23	52 ° 14.548′/ 104 ° 45.243′	25	3.5	-65,5	0	20.0	8.27
							5	18.5	8.42
							10	16.0	8.22
15	центр напротив залива Ершовский	20.08.23	52 ° 21.511′/ 104 ° 37.550′	27	3.5	-55,8	0	18.0	8.13
							5	17.3	8.20
							10	16.4	8.13
16	залив Ершовский	20.08.23	52 ° 20.851′/ 104 ° 34.439′	16	3.0	-53,0	0	18.9	8.28
							5	17.9	8.08
							10	16.6	7.93
17	верхний бьеф	20.08.23	52 ° 23.478′/ 104 ° 33.722′	25	3.5	-56,1	0	18.6	8.16
							5	17.6	8.25
							10	15.8	8.07

Таблица 2. Распределение видов фитопланктона в Южном Байкале и Иркутском водохранилище в августе 2023 г. «+» — наличие этого вида. Соответствующими цветами выделены виды, численность которых превышала 10, 50, 100 тыс. кл/л. Градация цвета темнее по мере увеличения номера. Названия станций на Рисунке 1.

Таксоны	Южный Байкал									Иркутское водохранилище							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Cyanobacteria																	
<i>Anabaena</i> sp.																	+
<i>Aphanothece</i> sp.	+		+	+	+		+			+	+		+			+	
<i>Cyanodictyon</i> sp.	+			+									+				
<i>Cyanodictyon planctonicum</i> B.A. Mayer	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
<i>Dolichospermum flos-aquae</i> (Bornet & Flahault) P.Wacklin, L.Hoffmann & Komárek						+	+			+	+				+	+	+
<i>Dolichospermum lemmermannii</i> (Richter) P. Wacklin, L. Hoffmann & J.Komárek	+		+	+	+		+	+			+	+	+	+	+		+
<i>Dolichospermum scheremetieviae</i> (Elenkin) Wacklin, L. Hoffmann & Komárek														+	+		
<i>Limnococcus limneticus</i> (Lemmermann) Komárková, Jezberová, O.Komárek & Zapomelová						+											
<i>Microcystis</i> sp.	+	+	+	+	+							+					
<i>Microcystis pulverea</i> (H.C.Wood) Forti											+		+				
<i>Pseudanabaena galeata</i> Böcher				+								+					
Cryptophyta																	
<i>Komma caudata</i> (L. Geitler) D.R.A. Hill	+	+	+	+	+		+										
<i>Rhodomonas pusilla</i> (Bachmann) Javornický		+	+				+			+			+				
Dinophyta																	
<i>Ceratium hirundinella</i> (O.F. Müller) Dujardin				+						+	+	+		+		+	+
<i>Glenodinium</i> sp.	+		+	+		+	+			+							
Haptophyta																	
<i>Chrysochromulina parva</i> Lackey				+													
Chrysophyta																	
<i>Chrysosphaerella coronacircumspina</i> Wujek & Kristiansen	+	+	+	+		+		+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Chrysosphaerella brevispina</i> Korshikov															+		
<i>Dinobryon bavaricum</i> Imhof	+	+	+	+	+	+	+	+	+								
<i>Dinobryon crenulatum</i> West & G.S. West	+		+														
<i>Dinobryon cylindricum</i> O.E. Imhof		+	+	+	+	+	+										
<i>Dinobryon cylindricum</i> var. <i>palustre</i> Lemmermann		+	+			+											
<i>Dinobryon divergens</i> O.E. Imhof		+		+							+			+	+	+	+
<i>Dinobryon korshikovii</i> Matvienko ex Kapustin	+	+		+	+		+			+	+	+		+	+	+	+
<i>Dinobryon pediforme</i> (Lemmermann) Steinecke	+			+	+	+	+										
<i>Dinobryon sociale</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Dinobryon sociale</i> var. <i>americanum</i> (Brunnthal) Bachmann	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Dinobryon stipitatum</i> Stein	+		+		+	+											

Таксоны	Южный Байкал									Иркутское водохранилище							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Dinobryon suecicum</i> var. <i>longispinum</i> Lemmermann		+				+	+	+				+					
<i>Kephyrion</i> sp.																	
<i>Kephyrion littorale</i> J.W.G. Lund	+			+	+		+	+									
<i>Kephyrion spirale</i> (Lackey) Conrad				+		+	+										
<i>Paraphysomonas gladiata</i> Preisig & Hibberd	+		+	+	+	+		+		+	+			+	+	+	+
<i>Paraphysomonas uniformis</i> subsp. <i>hemiradia</i> J.M.Scoble & T.Cavalier-Smith														+	+		+
<i>Paraphysomonas</i> sp.								+		+				+	+	+	
<i>Lepidochromonas butcheri</i> (Pennick & Clarke) Kapustin & Guiry																+	
<i>Spiniferomonas abrupta</i> Nielsen					+		+		+						+		
<i>Spiniferomonas cornuta</i> Balonov	+		+	+		+	+	+		+	+			+	+	+	
<i>Spiniferomonas bourrellyi</i> Takahashi	+		+	+		+		+		+		+	+		+	+	+
<i>Spiniferomonas takahashii</i> (Nicholls) Preisig & Hibberd				+			+	+		+	+	+			+		
<i>Spiniferomonas trioralis</i> (E. Takahashi) Preisig & Hibberd	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Spiniferomonas trioralis</i> f. <i>cuspidata</i> Balonov	+		+			+			+	+							
<i>Spiniferomonas septispina</i> Nicholls				+						+				+	+		
<i>Spiniferomonas silverensis</i> Nicholls											+			+	+	+	
<i>Mallomonas acaroides</i> Perty							+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Mallomonas alpina</i> Pascher & Ruttner		+		+		+		+	+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Mallomonas crassisquama</i> (Asmund) Fott											+						
<i>Mallomonas tonsurata</i> Teiling	+		+		+	+				+	+	+	+	+	+	+	
<i>Mallomonas vannigera</i> Asmund																+	
<i>Synura</i> sp. 1					+	+					+			+		+	
<i>Synura</i> sp. 2											+					+	
<i>Synura</i> cf. <i>glabra</i>											+		+	+	+		+
Bacillariophyta																	
<i>Acanthoceras zachariasii</i> (Brun) Simonsen										+	+					+	+
<i>Asterionella formosa</i> Hassall	+						+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aulacoseira baicalensis</i> (K.I. Meyer) Simonsen			+	+	+	+			+	+			+	+	+		+
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (O. Müller) Simonsen					+		+			+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Aulacoseira islandica</i> (O. Müller) Simonsen					+						+	+	+	+		+	+
<i>Aulacoseira ambigua</i> (Grunow) Simonsen										+					+	+	
<i>Cyclostephanos dubius</i> (Hustedt) Round	+		+	+	+		+	+		+	+			+	+	+	+
<i>Cyclostephanos makarovae</i> (S.I. Genkal) K. Schultz	+	+		+		+		+	+	+	+		+	+	+	+	+
<i>Discostella pseudostelligera</i> (Hustedt) Houk & Klee				+			+	+		+	+	+	+	+	+	+	
<i>Fragilaria capucina</i> Desmazières										+	+	+		+	+	+	+
<i>Fragilaria crotonensis</i> Kitton																+	
<i>Fragilaria radians</i> (Kützing) D.M.Williams & Round		+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Таксоны	Южный Байкал									Иркутское водохранилище							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Hannaea baicalensis</i> Genkal, Popovskaya & Kulikovskiy										+				+		+	+
<i>Lindavia baicalensis</i> (Skvortsov & K.I.Meyer) Nakov, Guillory, M.L. Julius, E.C. Theriot & A.J. Alverson	+	+		+	+	+											
<i>Lindavia minuta</i> (Skvortzov) T.Nakov & al.	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Nitzschia graciliformis</i> Lange-Bertalot & Simonsen	+	+		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow										+						+	
<i>Stephanodiscus meyeri</i> Genkal & Popovskaya			+								+					+	+
<i>Stephanodiscus minutulus</i> (Kützing) Cleve & Möller	+	+		+		+			+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Thalassiosira pseudonana</i> Hasle & Heimdal				+		+	+		+	+	+	+		+	+	+	+
<i>Ulnaria acus</i> (Kützing) Aboal							+		+	+				+	+	+	
<i>Urosolenia eriensis</i> (H.L. Smith) Round & R.M. Crawford										+					+	+	
Chlorophyta																	
<i>Ankistrodesmus arcuatus</i> Korshikov	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Chlamydomonas</i> sp.		+															
<i>Chlorella vulgaris</i> Beijerinck		+	+	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+	+	+
<i>Coenococcus planctonicus</i> Korshikov	+	+	+	+	+	+	+	+				+	+				
<i>Coenocystis</i> sp.										+		+		+	+	+	+
<i>Desmodesmus abundans</i> (Kirchner) E.H. Hegewald	+				+												+
<i>Desmodesmus armatus</i> (Chodat) E.H. Hegewald											+						
<i>Desmodesmus bicaudatus</i> (Dedusenko) P.M. Tsarenko	+						+				+						
<i>Desmodesmus communis</i> (E. Hegewald) E. Hegewald	+									+	+	+		+		+	+
<i>Desmodesmus intermedius</i> (Chodat) E. Hegewald																+	+
<i>Dictyosphaerium ehrenbergianum</i> Nägeli					+												
<i>Elakatothrix genevensis</i> (Reverdin) Hindák	+		+			+	+	+		+	+		+	+	+	+	+
<i>Franceia ovalis</i> (Francé) Lemmermann												+					
<i>Kirchneriella lunaris</i> (Kirchner) Möbius					+	+					+			+	+	+	
<i>Koliella longiseta</i> (Vischer) Hindák	+		+							+	+		+	+		+	+
<i>Koliella variabilis</i> (Nygaard) Hindák	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+	+
<i>Lagerheimia genevensis</i> (Chodat) Chodat				+						+	+	+			+		+
<i>Monoraphidium circinale</i> (Nygaard) Nygaard	+	+	+	+													
<i>Monoraphidium contortum</i> (Thuret) Komárková-Legnerová	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+
<i>Monoraphidium griffithii</i> (Berkeley) Komárková-Legnerová	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+
<i>Monoraphidium minutum</i> (Nägeli) Komárková-Legnerová	+	+		+			+	+		+		+		+		+	+
<i>Mychonastes homosphaera</i> (Skuja) Kalina & Puncová	+	+	+	+	+	+	+	+	+								

Таксоны	Южный Байкал									Иркутское водохранилище							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Pseudopediastrum</i> aff. <i>integrum</i> (Nägeli) M. Jena & C. Bock			+														
<i>Stauridium tetras</i> (Ehrenberg) E. Hegewald				+						+		+			+		
<i>Scenedesmus</i> sp.	+						+						+				
<i>Scenedesmus ecoris</i> (Ehrenberg) Chodat	+		+		+	+	+	+		+		+		+	+		+
<i>Scenedesmus obtusus</i> Meyen														+			
<i>Sphaerocystis</i> sp.	+	+		+							+						
<i>Tetraëdron minimum</i> (A. Braun) Hansgirg							+					+					
<i>Tetraëdron trigonum</i> f. <i>gracile</i> (Reinsch) De Toni														+		+	
Total	45	32	37	48	34	39	44	31	21	50	50	40	29	48	47	55	46

Примечание:Примерная концентрация, $\times 10^3$ кл./л

Цyanobacteria	10	50	100
Chrysophyta	10	50	100
Bacillariophyta	10		
Chlorophyta	10	50	

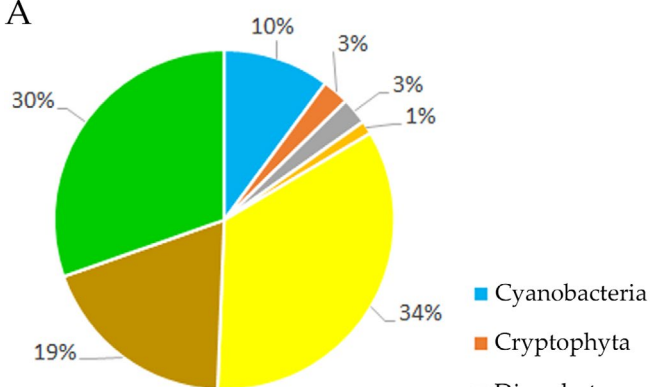
planctonicum, *Cyanodictyon* sp. и *Microcystis* sp., при этом, несмотря на самую высокую численность, общая биомасса не превышала 107 мг/м³. На ст. 3 наибольшую биомассу определили виды *Dinobryon*. Общая численность и биомасса фитопланктона в Иркутском водохранилище были ниже, чем в Южном Байкале, и изменялись от 186×10^3 до 310×10^3 кл./л и от 41 до 140 мг/м³ соответственно (Рис.3).

3.3. Видовой состав фитопланктона Южного Байкала

Видовое богатство фитопланктона Южного Байкала варьировало в пределах 21-48 видов (Рис.2, Таблица 2). Chrysophyta включали в себя 27 видов и внутривидовых таксонов, из которых 15 были чешуйчатыми хризифитовыми. Chlorophyta состояли из 24 видов, за которыми следовали диатомовые водоросли (15), Cyanobacteria (8), Cryptophyta (2), Dinophyta (2) и Haptophyta (1) (Рис.2, Таблица 2).

Наиболее высокую численность имели цианобактерии, такие как *Cyanodictyon planctonicum* (840×10^3 кл./л на ст. 1), *Microcystis* sp. (833×10^3 кл./л на ст. 1), *Cyanodictyon* sp. (768×10^3 кл./л на ст. 1) и *Dolichospermum lemmermannii* (25×10^3 кл./л на ст. 1). Что касается крупноклеточных видов хризифитовых, то *Dinobryon bavaricum* (109×10^3 кл./л на ст. 4), *Dinobryon cylindricum* var. *palustre* (54×10^3 кл./л на ст. 3), *Dinobryon sociale* (80×10^3 кл./л на ст. 6), *Dinobryon sociale* var. *americanum* (93×10^3 кл./л на ст. 3), *Dinobryon cylindricum* (27×10^3 кл./л на ст. 3) играли заметную роль (Рис.3, 4). Среди зеленых

А



В

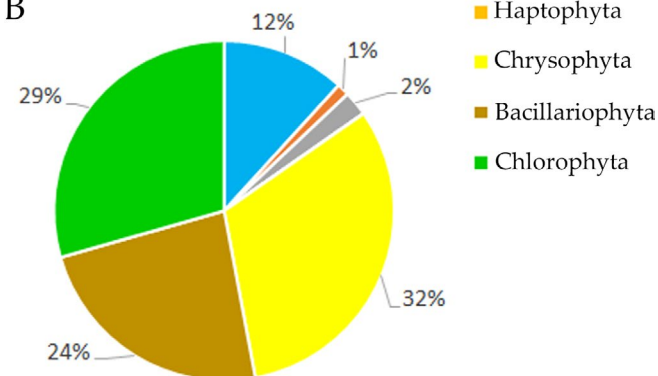


Рис.2. Процентное соотношение разных групп водорослей в Южном Байкале (А) и в Иркутском водохранилище (В) в августе 2023 г.

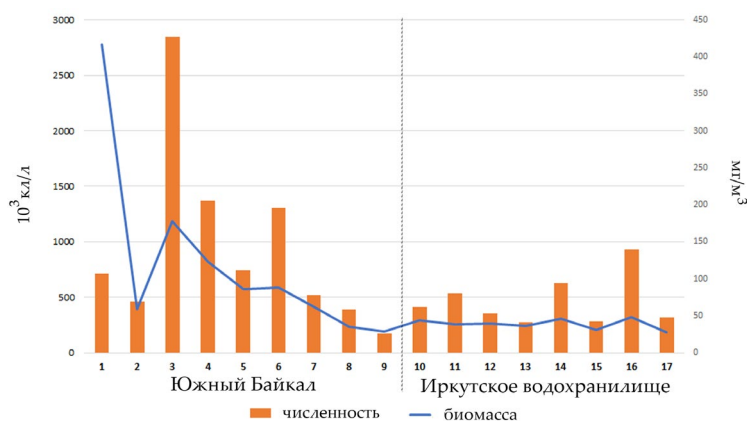


Рис.3. Распределение численности и биомассы фитопланктона Южного Байкала и Иркутского водохранилища в августе 2023 г.

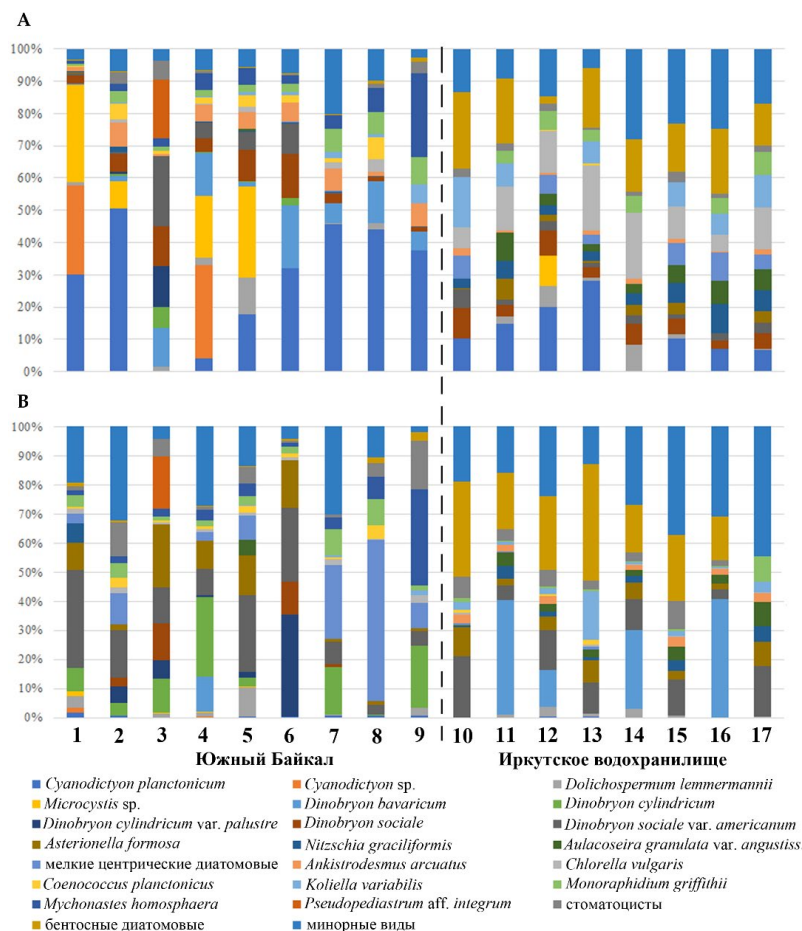


Рис.4. Распределение численности и биомассы доминирующих видов фитопланктона в Южном Байкале и Иркутском водохранилище в августе 2023 г.

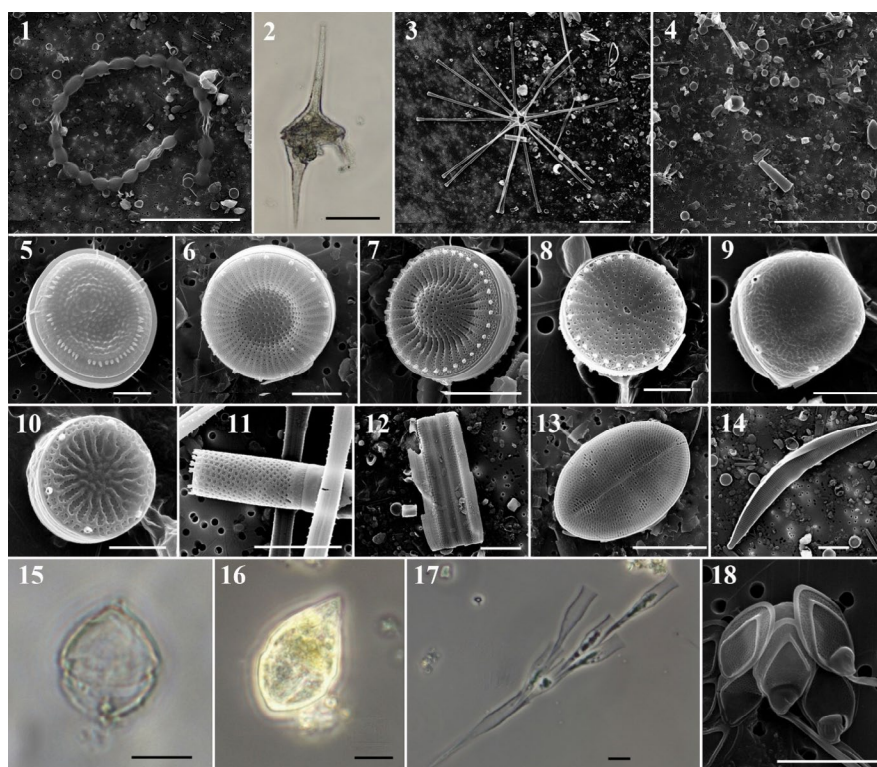


Рис.5. Представители Южного Байкала и Иркутского Водохранилища: 1 – *Dolichospermum flos-aquae*; 2 – *Ceratium hirundinella*; 3 – *Asterionella formosa*; 4 – общий план пробы из Иркутского водохранилища (напротив залива Еловый); 5 – *Lindavia minuta*; 6 – *Cyclostephanos dubius*; 7 – *Cyclostephanos makarovae*; 8 – *Stephanodiscus minutulus*; 9 – *Thalassiosira pseudonana*; 10 – *Discostella pseudostelligera*; 11 – *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*; 12 – *Fragilaria capucina*; 13 – *Cocconeis placentula*; 14 – *Hannaea baicalensis*; 15 – *Peridinium* sp.; 16 – *Gyrodinium helveticum*; 17 – *Dinobryon bavaricum*; 18 – *Mallomonas alpina*. Масштабная линейка: 1, 3, 4 – 50 μm ; 2, 12, 14–17 – 10 μm ; 5–7, 11, 13, 18 – 5 μm ; 8–10 – μm .

выделялись три вида - *Ankistrodesmus arcuatus* (42×10^3 кл./л на ст. 4), *Monoraphidium griffithii* (30×10^3 кл./л на ст. 7) and *Mychonastes homosphaera* (42×10^3 кл./л на ст. 4) которые преобладали как по численности, так и по биомассе (Рис.4, 5). Диатомовые имели низкие количественные показатели и не превышали 10×10^3 кл./л.

Тепловодная диатомовая водоросль *Asterionella formosa* (12×10^3 кл./л) присутствовала только на ст. 1 (Рис.4).

3.4. Видовой состав фитопланктона Иркутского водохранилища

Фитопланктон Иркутского водохранилища имел сходство с байкальским, но его численность была ниже, а видовое богатство выше (29–50 видов) (Рис.2, Таблица 2). Хризифитовые включали 27 видов и внутривидовых таксона, также как и в оз. Байкал, из которых преобладали кремнистые чешуйчатые хризифитовые (22 вида). Также, как и в озере, к доминирующим относились цианобактерии, такие как *Cyanodictyon planctonicum* (42×10^3 кл./л на ст. 12), *Microcystis* sp. (20×10^3 кл./л на ст. 12), *Dolichospermum lemmermannii* (25×10^3 кл./л на ст. 14), зеленые водоросли, такие как *Chlorella vulgaris* (59×10^3 кл./л на ст. 14), *Koliella longiseta* (41×10^3 кл./л на ст. 10) и *Monoraphidium griffithii* (15×10^3 кл./л на ст. 14). Численность крупноклеточных видов хризифитовых существенно снизилась, из них *Dinobryon sociale* (24×10^3 кл./л на ст. 10) и *Dinobryon sociale* var. *americanum* (16×10^3 кл./л на ст. 10) были доминирующими. Среди Bacillariophyta *Asterionella formosa* (10×10^3 кл./л на ст. 14), *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (11×10^3 кл./л на ст. 15) и *Nitzschia graciliformis* (13×10^3 кл./л на ст. 15) имели низкую численность. Мелкие центрические виды диатомовых водорослей, такие как *Cyclostephanos makarovae*, *Stephanodiscus minutulus*, *Cyclostephanos makarovae*, *Discostella pseudostelligera* и *Thalassiosira pseudonana*, также имели низкую численность. Самая высокая численность мелких центрических диатомей – 19×10^3 кл./л – была на ст. 10.

3.5. Видовой состав фитопланктона заливов Иркутского водохранилища

Видовой состав фитопланктона заливов и центральной части Иркутского водохранилища был сходным. Бентосные диатомеи имели большую численность ($45-64 \times 10^3$ кл./л в заливах из-за их мелководности. Общая численность и биомасса варьировали от 242×10^3 до 321×10^3 кл./л, 41 и 140 мг/м^3 соответственно (Рис.3). Наибольшее видовое богатство было в Ершовском заливе (ст. 16) (55 видов) за счет диатомовых водорослей (19) и кремнистых чешуйчатых хризифитовых (18). В заливе Курма (ст. 11) выявлено 50 видов, и в заливе Еловый (ст. 13) — 29 (Рис.2, Таблица 2). Во всех трех заливах преобладали цианобактерии *Cyanodictyon*

planctonicum ($22-68 \times 10^3$ кл./л и зеленые *Chlorella vulgaris* ($16-48 \times 10^3$ кл./л) (Рис.3). Доминирующими видами были диатомовые водоросли *Nitzschia graciliformis* (до 29×10^3 кл./л), *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* (до 23×10^3 кл./л) и мелкие центрические виды (до 28×10^3 кл./л), среди которых наиболее многочисленными были *Stephanosculus minutulus* и *Thalassiosira pseudonana*. Микрофотографии летних видов фитопланктона представлены на рисунке 5.

3.6. Сравнение сообществ фитопланктона и влияния факторов окружающей среды

Как показывает анализ, сообщества Южного Байкала и Иркутского водохранилища четко разделились на две группы (Рис.6). Важно отметить, что аналогичные закономерности были получены с использованием всех трех типов данных о составе сообществ: численности видов, биомассы видов и матрицы присутствия/отсутствия (Рис.6А-С). Объяснительная сила была самой высокой для модели, полученной методом RDA на основе данных о численности видов (Рис.6А); ее скорректированный коэффициент детерминации (adjusted R²) достигал 31%. Эта модель включала две переменные окружающей среды, а именно прозрачность воды и pH, действующие и влияющие на состав сообществ в сходном направлении. Объяснительная сила моделей, полученных на основе данных о биомассе видов (Рис.6В) и присутствии/отсутствии (Рис.6С), составила 19% и 9% соответственно. При этом в моделях сохранялся единственный экологический фактор – прозрачность воды.

Установлена хорошая положительная корреляция численности и биомассы мелких центрических и бентосных диатомей (Рис.6D). Кроме того, численность и биомасса стоматоцист также имели выраженную положительную корреляцию с общей биомассой. Рассматривая гидрофизические и гидрохимические параметры, можно видеть, что прозрачность воды и pH оказали негативное влияние на численность и биомассу мелких центрических и донных диатомей. Прозрачность воды и температура также отрицательно коррелировали между собой.

4. Обсуждение

Наши исследования показали, что летом температура поверхностных вод в Южном Байкале и Иркутском водохранилище были сходными в отличие от июня 2023 г. (Firsova et al., 2023). Состав доминирующих видов сообществ фитопланктона Иркутского водохранилища и Южного Байкала был сходным (Рис.2, Таблица 2). Однако, как и в июне 2023 г., в составе сообществ Южно-Байкала и Иркутского водохранилища выявлены существенные различия (Рис.6А-С). Выявлено, что основным показателем этого эффекта является такой простой

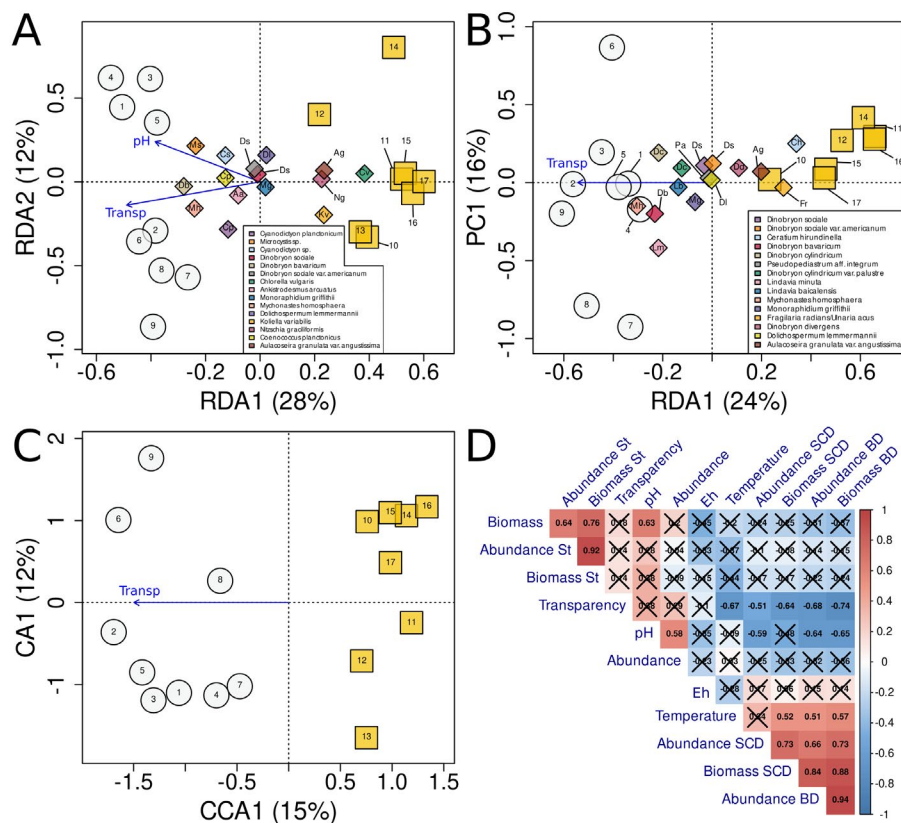


Рис.6. Корреляция параметров окружающей среды и ограниченная ординация численности видов, биомассы и данных о присутствии/отсутствии. (A) – Анализ избыточности на основе данных о численности видов; (B) – Анализ избыточности на основе данных о биомассе видов; (C) – Ограниченный анализ соответствия на основе данных о присутствия/отсутствия видов; Серые кружки – места отбора проб в Южном Байкале. Желтые квадраты – точки отбора проб в Иркутском водохранилище. Ромбы – топ-15 доминирующих видов фитопланктона. Синие стрелки – объясняющие переменные, используемые в модели. (D) – Анализ корреляции параметров окружающей среды и суммарных числовых переменных. Значения представляют собой коэффициенты корреляции Пирсона с цветовой маркировкой справа. Зачеркнутые ячейки представляют незначимые корреляции ($p > 0,05$). Гидрофизические и гидрохимические параметры (прозрачность воды, температура воды, pH и окислительно-восстановительный потенциал) использовались в качестве объясняющих переменных при ограниченной ординации. БД – донные диатомеи, SCD – мелкие центрические диатомеи, St – stomatocysts.

гидрофизический параметр, как прозрачность воды, который в пробах Иркутского водохранилища значительно снижен. Единственным интригующим отличием результатов поисковых анализов июньских и августовских комплексов фитопланктона стал сдвиг бурдугузского сообщества в группу проб Иркутского водохранилища, по сравнению с июнем (Firsova et al., 2023). Этот эффект можно объяснить смещением в конце лета границы перехода температуры Байкал/водохранилище вверх по течению Ангары. Летом повышение температуры поверхностных вод (Таблица 1) способствует росту тепловодных видов фитопланктона как в озере, так и в водохранилище. На всех станциях доминировали мелкоклеточные колониальные цианобактерии. Среди этих цианобактерий наибольшую численность в Южном Байкале имел вид *Cyanodictyon planctonicum* на ст. 1 (12 км от Култук). Установлено, что численность и биомасса летнего фитопланктона Иркутского водохранилища невысоки, что аналогично результатам предыдущих исследований (Воробьева, 1995; Popovskaya et al., 2012). Как и в предыдущие годы (Воробьева, 1995; Popovskaya et al., 2012), доминирующим видом была цианобактерия *Dolichospermum lemmermannii*, численность

которой была ниже 25×10^3 кл./л. Тогда как во второй половине августа и начале сентября 1985 г. численность достигала *Dolichospermum lemmermannii* $7,2 \times 10^6$ кл./л (Воробьева, 1995). В июне 2023 г. *Nitzschia graciliformis* доминировала как в Южном Байкале, так и в Иркутском водохранилище (Firsova et al., 2023). В августе 2023 г. этот вид также оставался одним из доминирующих, но его численность значительно снизилась по сравнению с июнем.

Выявленные в наших исследованиях доминирующие виды летнего фитопланктона были аналогичны предыдущим исследованиям 60-х и 80-х годов (Воробьева, 1995), и 2008 г. (Popovskaya et al., 2012), что свидетельствует о стабильности видового состава. По сравнению с предыдущими исследованиями (Кожова, 1964; Воробьева, 1995; Popovskaya et al., 2012) произошли некоторые изменения: увеличилось видовое богатство фитопланктона и число доминирующих видов. Среди Chlorophyta были наиболее распространены *Chlorella vulgaris* и *Mychonastes homosphaera*, а среди Chrysophyta преобладала *Dinobryon sociale*. О высоком богатстве хризифитовых Иркутского водохранилища уже сообщалось, поскольку оно является самым холодным и имеет самые низкие концентрации питательных

веществ среди других водоемов Ангарского каскада (Воробьева, 1995; Bessudova et al., 2023b). Мы отметили также высокое видовое богатство рода *Dinobryon* (11 таксонов) в Южном Байкале, включая ранее не указанные здесь таксоны, такие как *Dinobryon crenulatum* и *Dinobryon suecicum* var. *longispinum*. Эти виды, вероятно, были вынесены в озеро из притоков, и для их развития в Южном Байкале сложились более благоприятные условия, включающие более высокую прозрачность, отсутствие течения и минимальное развитие диатомей, конкурирующих с ними за кремний. Ранее было показано, что эти факторы играют важную роль в формировании высокого видового разнообразия хризифитовых в заливе реки Обь (Bessudova et al., 2023a). Видовой состав доминирующих также пополнился видами *Dinobryon sociale* и *Dinobryon sociale* var. *americanum*. Видовой состав кремнистых чешуйчатых хризифитовых изменился по отношению к весеннему комплексу видов (Bessudova et al., 2023b), обогатившись видами, типичными для более теплых вод (Bessudova et al., 2021), такими как *Paraphysomonas gladiata*, *Paraphysomonas uniformis* subsp. *hemiradia*, *Lepidochromonas butcheri*, *Spiniferomonas septispina*.

5. Заключение

Несмотря на сходные параметры среды, такие как температура и pH воды, а также большое количество общих таксонов, общая численность и биомасса летнего фитопланктона в Южном Байкале выше, чем в Иркутском водохранилище. Имелись расхождения в видовом составе и списке доминирующих видов. В Южном Байкале цианобактерии имели высокую численность, хотя в Иркутском водохранилище их рост был ограниченным. Что касается предыдущих исследований, в том числе проведенных в июне 2023 г., общее богатство увеличилось за счет видов Chrysophyta. Общая численность и биомасса фитопланктона соответствовали летнему периоду предыдущих лет.

Благодарности

Выражаем благодарность команде научно-исследовательского судна «Папанин» за слаженную работу. Микроскопические исследования выполнены в Центре электронной микроскопии ЦКП «Ультрамикроанализ» Лимнологического института, <https://www.lin.irk.ru/copp/>. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-14-00028, <https://rscf.ru/project/23-14-00028/>.

Конфликт интересов

Авторы настоящим заявляют, что данная исследовательская работа и выпуск рукописи соответствуют этическим стандартам и ни у кого из авторов нет потенциального конфликта интересов.

Мы также заявляем, что это исследование не финансировалось каким-либо агентством помимо РФ.

Список литературы

- Васильева Г.Л., Кожова О.М. 1960. Некоторые данные о бактерио-, фито- и зоопланктоне Иркутского водохранилища в годы его образования (1957-1958 гг.). Бюллетень Института биологии водохранилищ 8-9:6-8.
- Васильева Г.Л., Кожова О.М. 1963. Планктон Иркутского водохранилища. Труды ВГБО 13:25-55.
- Воробьева С.С. 1981. Фитопланктон Приангарских водоемов. Круговорот вещества и энергии в водоемах 1: 50-52.
- Воробьева С.С. 1985. Межгодовые изменения фитопланктона в водоемах Ангары. Круговорот вещества и энергии в водоемах 2: 20-22.
- Воробьева С.С. 1995. Фитопланктон Ангарских водохранилищ. Новосибирск: Сибирское издательство «Наука».
- Кожова О.М. 1964. Фитопланктон Иркутского водохранилища. Москва: Наука.
- Корнева Л.Г. 2015. Фитопланктон водоемов Волжского бассейна. Кострома: Костромская типография.
- Михайлов В.В. 2020. Оценка современного экологического состояния Новосибирского водохранилища по показателям развития фитопланктона. канд. наук. Диссертация, Северный Зауральский государственный аграрный университет, Тюмень, Россия.
- Поповская Г.И., Фирсова А.Д. 2005. Фитопланктон Харанорского водохранилища. В: Кириллов В.В. (Ред.), Водоем-охладитель Харанорской ГРЭС и его жизнь. Новосибирск, стр. 58-71.
- Шур Л.А. 2009. Фитопланктон как индикатор состояния экосистемы водоема-охладителя Березовской ГРЭС-1 (Красноярский край). Водные ресурсы 36(5): 597-605.
- Ясницкий В.Н. 1926. Материалы для познания рек Иркутской области. Известия Восточно-Сибирского Отдела Императорского Русского Географического Общества 9(2): 104-114.
- Bessudova A.Yu., Gabyshev V.A., Firsova A.D. et al. 2021. Diversity of silica-scaled chrysophytes and physicochemical parameters of their environment in the estuaries of rivers in the Arctic watershed of Yakutia, Russia. Sustainability 13(24): 13768. DOI: [10.3390/su132413768](https://doi.org/10.3390/su132413768)
- Bessudova A., Likhoshway Y., Firsova A. et al. 2023. Small Organisms in a Large River: What Provides the High Diversity of Scaled Chrysophytes in the Ob River? Water 15(17): 1-29. DOI: [10.3390/w15173054](https://doi.org/10.3390/w15173054)
- Bessudova A.Y., Galachyants Y., Firsova A.D. et al. 2023. Changes in diversity of silica-scaled Chrysophytes during lake-river-reservoir transition (Baikal-Angara-Irkutsk Reservoir). Life 13(10): 1-17. DOI: [10.3390/life13102052](https://doi.org/10.3390/life13102052)
- Firsova A.D., Galachyants Y., Bessudova A.Y. et al. 2023. Environmental factors affecting distribution and diversity of phytoplankton in the Irkutsk Reservoir ecosystem in June 2023. Diversity 15(10): 1-20. DOI: [10.3390/d15101070](https://doi.org/10.3390/d15101070)
- Legendre P., Gallagher E.D. 2001. Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. Oecologia 129: 271-280. DOI: [10.1007/s004420100716](https://doi.org/10.1007/s004420100716).
- Nogueira M.G., Ferrareze M., Moreira M.L. et al. 2010. Phytoplankton assemblages in a reservoir cascade of a large tropical – subtropical river (SE, Brazil). Brazilian Journal of Medical and Biological Research 70(3): 781-793.
- Obertegger U., Flaim G., Corradini S. et al. 2022. Multi-annual comparisons of summer and under-ice phytoplankton communities of a mountain lake. Hydrobiologia 849: 4613-4635. DOI: [10.1007/s10750-022-04952-3](https://doi.org/10.1007/s10750-022-04952-3)

Oksanen J., Simpson G.L., Blanchet G.F. et al. 2022. Vegan: Community Ecology Package. R Package Version 2.5-6. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>

Popovskaya G.I., Firsova A.D., Bessudova A.Yu. et al. 2012. Phytoplankton of the Irkutsk Reservoir as an indicator of water quality. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 41(2): 29-38. DOI: [10.2478/s13545-012-0014-2](https://doi.org/10.2478/s13545-012-0014-2)