

# Phytoplankton of the littoral zone of Lake Baikal

Original Article

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Fedotov A.P.\*<sup>ORCID</sup>, Domisheva V.M.<sup>ORCID</sup>, Sakirko M.V.<sup>ORCID</sup>, Vorobyeva S.S.<sup>ORCID</sup>

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

**ABSTRACT.** The study considers species composition, abundance, biomass of littoral phytoplankton of Lake Baikal in the spring (late May-early June) and autumn (late September) periods of 2017-2022. The study stations were located along the perimeter of the lake every 30-50 km. It characterises of the peculiarities of phytoplankton development in different areas of the lake and assesses the force of natural and anthropogenic factors on phytoplankton assemblage.

**Keywords:** Lake Baikal, season phytoplankton, anthropogenic loads

**For citation:** Fedotov A.P., Domisheva V.M., Sakirko M.V., Vorobyeva S.S. Phytoplankton of the littoral zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - P. 113-177. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-113

## 1. Introduction

The earliest references to Baikalian phytoplankton appear in the works of Gutwinski R.O., Dorogostaysky V.G., Meyer K.M., Yasnitsky V.N., Yashnov V.A. and others, dating to the late 19th and early 20th centuries. At the same time, the development of instrumental and expedition capabilities resulted in a rapid increase in the amount of information available about the quantitative indicators of Baikal algal flora and its geographic location. For example, as noted by Yasnitsky V.N. and Skabichevsky A.P. in 1957, 120 species and varieties of phytoplankton were documented, with approximately 40 species being observed to inhabit the pelagic lake. Popovskaya G.I. (1963) have noted that 210 species of phytoplankton were found in the Selenginsk shallows and adjacent sors, and more than 300 for Lake Baikal. According to Votintsev et al. (1975), a total of 92 species of phytoplankton were identified within the pelagic zone, however, a significant proportion of these species are not native for the zone, but rather, their presence is attributable to their displacement from rivers, shores, and bays. In addition, 122 species were already registered in the pelagic zone by 1990 (Genkal et al., 2006; Popovskaya, 1991). This raises the question: if the littoral zone of the lake is about 5% of the total area of the lake, then what number of this phytoplankton should be in the littoral zone in order for the currents to spread to 95% of the pelagic zone?

It is well known that the phytoplankton of Lake Baikal has three episodes of maximum production:

spring, beginning under the ice cover, summer, represented by picoplankton forms, and autumn; however, the main biomass of plankton is formed during the spring maximum (Antipova and Kozhov, 1953; Antipova, 1963; Popovskaya, 1977; Popovskaya, 2000). In some years, the spring maximum exceeds the autumn maximum by 100 times or more, while in others it is 2-8 times higher (Popovskaya et al., 2011). Furthermore, a considerable interannual variability of pelagic phytoplankton biomass is documented, ranging from 90 to 6000 mg/m<sup>3</sup> (Votintsev et al., 1975; Popovskaya et al., 2015; Usoltseva et al., 2023). It is noted that, there is no strong correlation have between individual basins of Lake Baikal with regard to phytoplankton indicators (Popovskaya, 1991).

The total biomass of phytoplankton in the littoral zone of Lake Baikal during the period 1958-1990 varied between 2 and 18 times higher than that of the pelagic zone (Popovskaya, 1991). In the littoral zone, dinoflagellates of the genus *Gymnodinium* Stein were more abundant, when their biomass can reach 100-300 g/m<sup>3</sup> (Popovskaya, 1987).

Since the 1980s, significant changes in algal communities have been observed in the pelagic zone of the lake. It is expressed in a decrease in the spring plankton of *Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonsen, an increased abundance of *A. islandica* (O. Müller) Simonsen, *Synedra Ehrenberg*, *Stephanodiscus meyeri* Genkal & Popovskaya, small-celled species of centric diatoms, small flagellate algae and the mass development of *Nitzschia graciliformis* Lange-Bertalot

\*Corresponding author.

E-mail address: [mix@lin.irk.ru](mailto:mix@lin.irk.ru) (A.P. Fedotov)

**Received:** November 20, 2024; **Accepted:** February 17, 2025;  
**Available online:** February 26, 2025

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



& Simonsen (Popovskaya, 1991; Popovskaya, 2000; Bondarenko et al., 2019). In the littoral part of the lake, an increase in the abundance of small, widespread diatoms and nanoplanktonic flagellates is observed in spring phytoplankton (Bondarenko and Logacheva, 2016; Bondarenko et al., 2020a). It is suggested that the main factors stimulating the growth of flagellates in the lake's waters near tributaries subject to active anthropogenic pressure are the availability of easily mineralized organic matter, along with the late onset and decrease in the duration of ice cover on the lake (Bondarenko et al., 2022).

Since 2011, significant changes have been recorded in the shallow waters of Lake Baikal in the benthic phyto-communities, expressed in the mass development of filamentous algae of the genus *Spirogyra* Link, when its projective cover of the bottom can reach 100% (Timoshkin et al., 2016). These algae are most abundant in areas adjacent to settlements (Timoshkin et al., 2018). The dying of algae leads to an anomalous increase in the quantity of organic matter in the lake ecosystem.

Another significant event in the Baikal ecosystem during the observed period was the transition from the low water regime of the lake tributaries to the high

water regime after 2018 (Fig. 1) (Sinyukovich et al., 2024). These changes could affect the influx of biogenic components with river input into the lake. The width of the mixing zone of river and Baikal waters has been determined to reach 1-5 km (Tomberg et al., 2019; Sorokovikova et al., 2019; Tomberg et al., 2024), and phytoplankton of the littoral zone can be sensitive to such changes. Accordingly, the influence of this natural factor on phytoplankton should also be considered in this study.

According to number of published studies, it can be seen that the phytoplankton of littoral zone were much less studied compared to pelagic zone, based on the number of observation stations and the duration of the observation time series. It is plausible to hypothesize that the phytoplankton in littoral stations may be more susceptible to the detrimental effects of anthropogenic activities. The present study was thus undertaken to describe the species composition of phytoplankton in the littoral of Lake Baikal, with particular reference to the limnic features and the level of anthropogenic load. Subsequent analysis of these data will facilitate comparison of the dynamics of the species composition and quantitative characteristics of phytoplankton in different parts of Baikal.

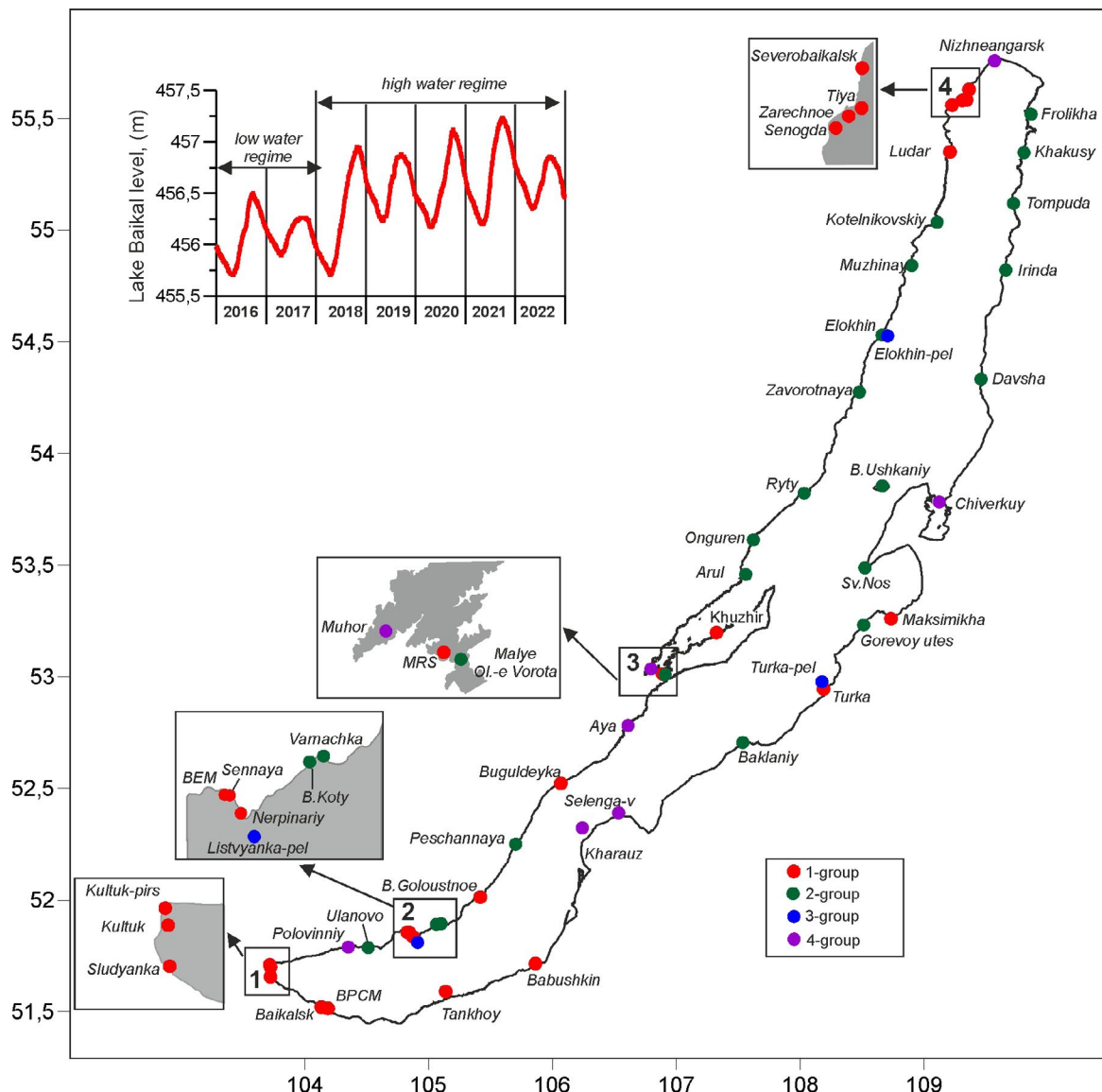


Fig.1. Location of phytoplankton sampling stations in 2017-2022. Color indicates the group of the stations.

## 2. Methods

Water sampling was made at two types of stations using a Niskin bathometer (Table 1). At the first type of stations, samples were collected from a depth of 1 m, and 100-200 m from the shoreline, where the lake depth averaged from 5 to 50 m. The second type of stations belonged to the pelagic part of Baikal, where samples were also collected from a depth of 1 m. Samples were collected from 2017-2022 in two seasons: late May-early June (301 stations) and in the second half of September (283 stations).

To identify the features of the phytoplankton community structure depending on the location of the sampling points, the stations were divided into four groups according to anthropogenic impact and limnic features (Fig. 1). The first group includes stations associated with high anthropogenic load and located near the settlements and cities: Kultuk, Slyudyanka, Baikalsk, the BCPM (Former Baikal Pulp and Paper Mill), Tankhoy, Babushkin, Turka, the Maksimikha, Severobaikalsk, the mouth of the Tyya River, Zarechnoye, the Senogda Bay, Baikalskoye (Cape Ludar), Khuzhir, the MRS station (the settlement of Sakhyurta), Buguldeyka, Bolshoe Goloustnoye. In the water area associated with the settlement of Listvyanka, the stations of Sennaya, Nerpinariy and BEM were selected.

The second group - stations with low or no anthropogenic load: Ulanovo, Cape Baklaniy, Cape Gorevoy Utes, Svyatoy Nos Peninsula (Nizhneye Izgolovye Cape), Bolshoy Ushkany Island, Davsha, Irinda Bay, Tompuda Bay, Khakusy Bay, Frolikha Bay, Kotelnikovsky Cape, Muzhinay Cape, Elokhin Cape, Zavorotnaya Bay, Ongureny Cape, Ryty Cape, Arul Cape, Malye Vorota (Malye Olkhonskiye Vorota Strait), Peschannaya Bay, Varnachka Bay, Bolshiye Koty settlement.

The third group included pelagic stations opposite (1-2 km) the settlement of Listvyanka, Elokhin Cape and settlement Turka. The fourth group included areas bordering with the estuary zones of rivers and large bays. These are the Selenga River (Kharauz station and Selenga-Vykhod station), the Verkhnyaya Angara River (near the settlement of Nizhneangarsk), Mukhor Bay (Small Sea), Aya Bay, Mys Polovinny (Bolshaya Polovinnaya River) and Chivyrkuisy Bay.

The measurement of chlorophyll *a*, the water was filtered through a 0.45 µm membrane filter, followed by the extraction of algal pigments with 90% acetone. Spectrophotometric measurements of the acetone extract were performed before and after the acidification process with hydrochloric acid. The chlorophyll *a* concentration was calculated based on the known specific spectral indices of light absorption *ChL* (GOST 17.1.4.02-90).

**Table 1.** Stations of sampling

E	N	Station	Depth, m	E	N	Station	Depth, m
105,864	51,724	Babushkin	12	108,664	54,538	Elokhin	9
104,135	51,529	Baykalsk	20	108,480	54,282	Zavorotny	10
106,069	52,530	Buguldeyka	26	109,663	54,829	Irinda	16
104,190	51,523	BPPM	13	109,108	55,043	Kotelnikovsky	20
105,419	52,021	B. Goloustnaya	20	108,903	54,849	Muzhinay	15
109,311	55,588	Zarechnoye	5	108,525	53,495	Sv.Nos	30
103,725	51,708	Kultuk	36	106,911	53,018	M. Olkhonskiye Vorota	18
109,212	55,357	Ludar	16	107,624	53,620	Onguren	13
108,735	53,268	Maksimikha	5	105,705	52,259	Peschanka	7
106,890	53,021	MRS	4	108,034	53,829	Rytyy	44
109,365	55,637	Severobaykalsk	18	109,725	55,127	Tompuda	26
109,228	55,567	Sometimes	8	108,666	53,863	B.Ushkaniy	20
103,724	51,664	Slyudyanka	16	109,866	55,526	Frolikha	23
105,125	51,648	Tankhoy	19	109,809	55,355	Khakusy	6
108,191	52,953	Turk	22	105,064	51,900	B.Koty	25
109,345	55,590	Tyya	8	104,514	51,795	Ulanovo	15
107,326	53,205	Khuzhir	16	108,709	54,534	Elokhin-pel.	
104,830	51,864	BEM	20	108,178	52,985	Turka-pel.	
103,719	51,718	Kultuk-pier	6	104,913	51,818	Listvyanka-pel	
104,843	51,864	Nerpinariy	16	106,612	52,789	Aya	10
104,875	51,844	Sennaya	36	109,572	55,766	Nizhneangarsk	8
107,562	53,466	Arul	15	106,797	53,043	Mukhor	5
107,539	52,714	Baklaniy	12	106,536	52,399	Selenga-v	10
105,103	51,902	Varnachka	22	106,243	52,331	Kharauz	20
108,515	53,240	Gorevoy utes	6	109,125	53,790	Chivyrkuy	20
109,462	54,340	Davsha	17	104,352	51,797	Polovinniy	25

For the analysis of phytoplankton, 1 L water samples were fixed with Lugol’s solution and then concentrated by gravitation. Algae were enumerated on two occasions in a 0.1 mL chamber under an Amplival light microscope with a magnification of ×800 and ×2000. The biomass was determined by taking into account the volume of individual cells (Kozhova and Melnik, 1978; Belykh et al., 2011).

Rare phytoplankton species, defined as those occurring in less than 5% of all stations over the entire study period, were excluded from the analysis. Statistical data processing was carried out in PAST 4.17 (Hammer et al., 2001). The diversity of species was assessed using the Shannon and Simpson index, while the interannual stability of species composition for each station was assessed using the Jaccard index. For example, the species composition of 2017 was compared to that of 2018, 2019, 2020, 2021, and 2022, and so on, trying all possible combinations. The Bray-Curtis distance was used in non-parametric multidimensional scaling (nMDS) and cluster analysis, and the numerical parameters of cluster boundaries were determined using the K-medoids method. The saprobity index was calculated for indicator species based on literature data (Barinova et al., 2006, *Algae: Handbook*, 1989), and Baikal endemics were assigned an index of 0.4 (xeno-oligaprobe).

### 3. Result and Discussion

#### 3.1. Spring phytoplankton assemblage

##### Spices composition, diversity and biomass

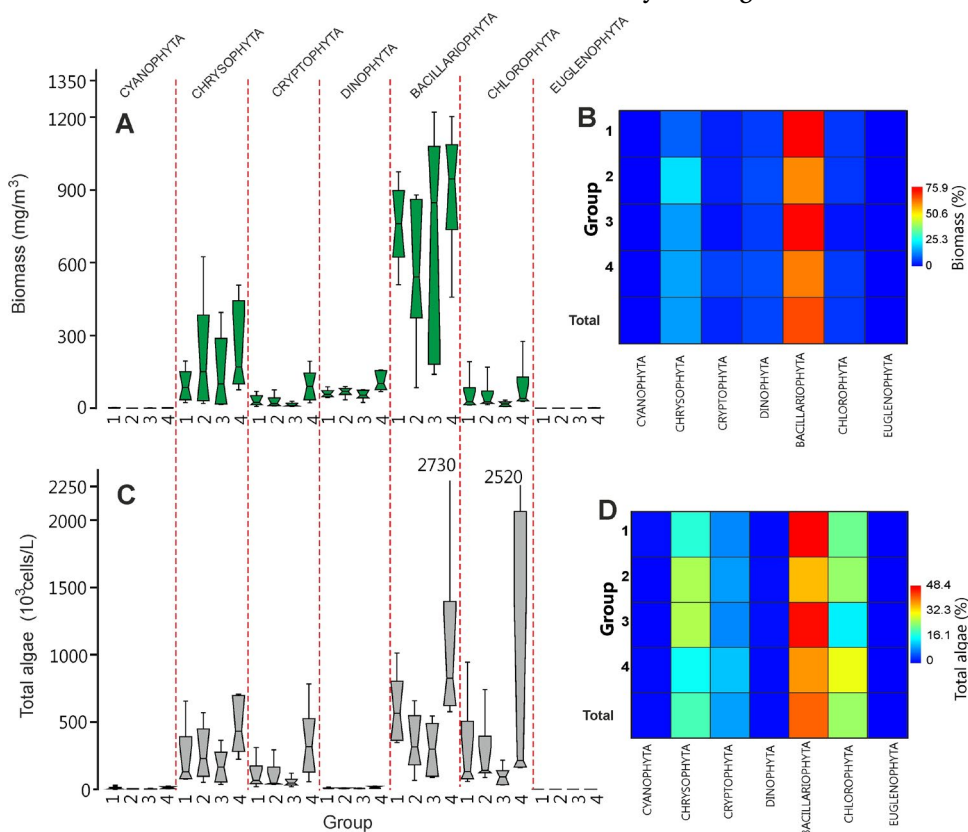
In the spring phytoplankton, diatoms were dom-

inant, with 67.5% of the total biomass. The ratio of haptophyta algae was recorded as 15%. The average biomass of diatoms in groups 1, 2, 3 and 4 was determined to be 756, 561, 713 and 904 mg/m<sup>3</sup>, respectively (Fig. 2). However, it should be noted that in 2021, the average biomass at stations in groups 3 and 4 reached up to 1200 mg/m<sup>3</sup>. The maximum observed biomass - 3901 mg/m<sup>3</sup> was recorded for *St. meyeri* at st. MRS in 2022. The interannual variability of the deviation of the average biomass values among diatoms is very significant, ranging from 163 mg/m<sup>3</sup> (1-group 1) to 454 mg/m<sup>3</sup> (3-group).

The means biomass of haptophyta in groups 1, 2, 3 and 4 were 94, 214, 167 and 242 mg/m<sup>3</sup>, respectively (Fig. 2). The maximum observed biomass -1641 mg/m<sup>3</sup> was for *Dinobryon cylindricum* Imhof at st. Arul in 2017. The interannual deviation of the means biomass of haptophyta varied from 66 (group 1) to 237 mg/m<sup>3</sup> (group 2). The average biomass of other phytoplankton in most cases did not exceed 100 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 2). Although, they rare could reach significantly higher values. Thus, the biomass of the green alga *Dictyosphaerium pulchellum* Wood was 1179 mg/m<sup>3</sup> at st. Mukhor Bay in 2019.

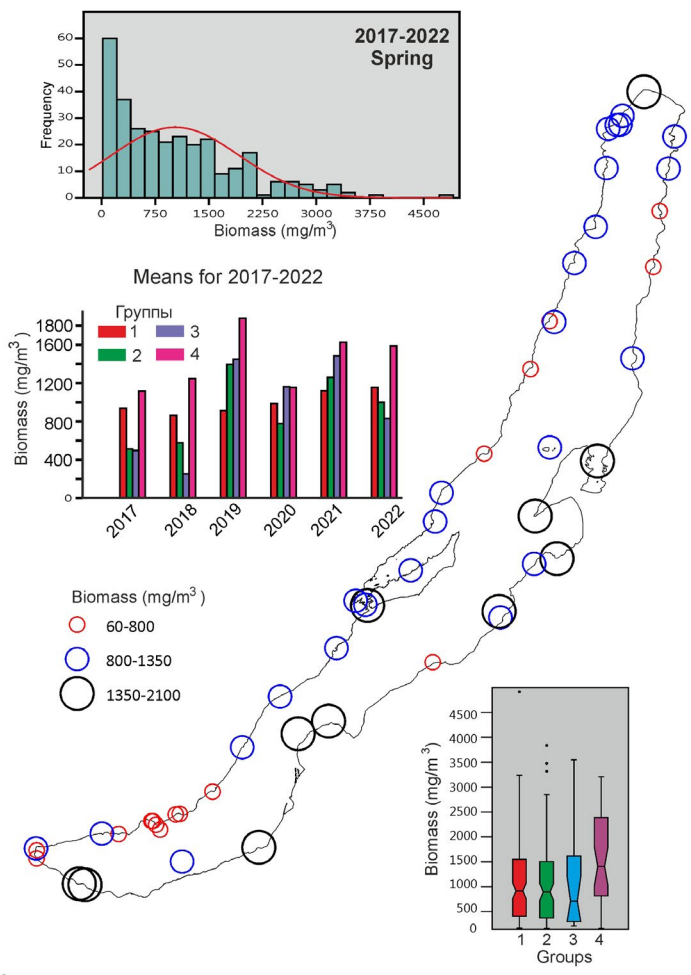
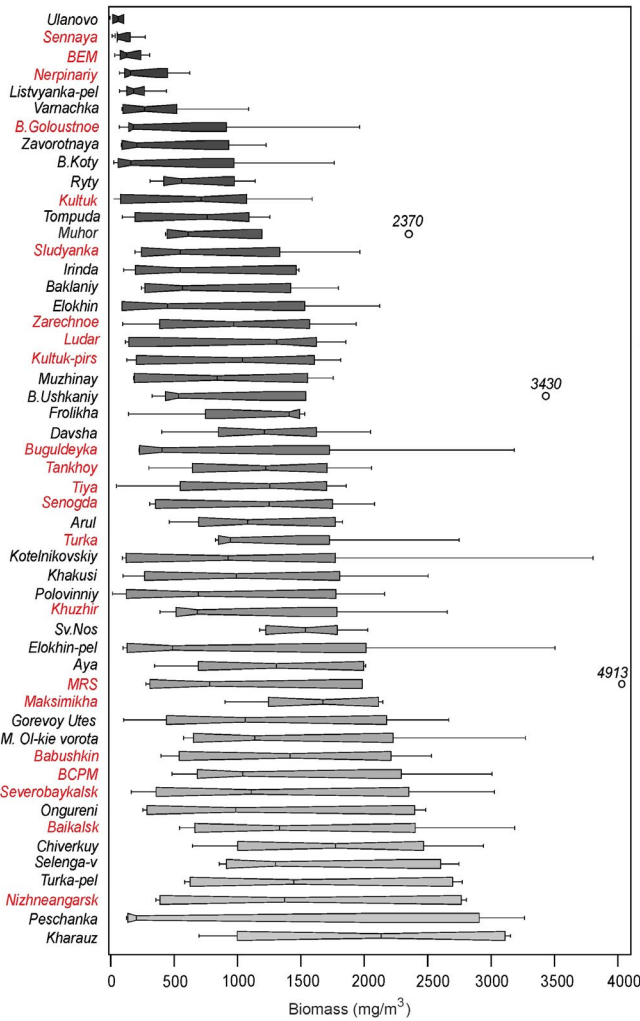
The highest values of phytoplankton biomass were recorded at stations of group 4, where the mean value was 1443 mg/m<sup>3</sup>. The mean values were 974, 933 and 945 mg/m<sup>3</sup> for stations of groups 1, 2 and 3, respectively.

The range of interannual fluctuations in phytoplankton biomass values at the stations is quite significant and can reach several thousand mg/m<sup>3</sup> (Fig. 3). For example, for the stations of group 1, the maximum biomass was at st. MRS -4913 mg/m<sup>3</sup> in 2022, however, it was only 277 mg/m<sup>3</sup> in 2021. Group 2 - 3803 mg/m<sup>3</sup>



**Fig.2.** Distribution of biomass (A) and phytoplankton abundance (C) at stations of different groups. Average values of the proportion of phytoplankton taxa (B, D).





**Fig. 3.** Distribution of biomass by stations in the spring of 2017-2022. On the left panel, the stations highlighted in red belong to group 1 of stations associated with high anthropogenic load.

at st.Kotelnikovskiy in 2022, in contrast this value was 92 mg/m<sup>3</sup> in 2017. Group 3 - 3505 mg/m<sup>3</sup> at st. Elokhin-Pelagic in 2021 and 97 mg/m<sup>3</sup> in 2018. For group 4 - 3154 mg/m<sup>3</sup> at st. Harauz in 2019 and 697 mg/m<sup>3</sup> in 2018.

The stations of South Baikal around Listvyanka and B. Koty are characterized by low variability of biomass from year to year. If we consider the mean biomass values for 2017-2022, the stations can be divided into three classes: 60-799, 800-1359, and 1360-2100 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 3). At the same time, the minimum biomass values were recorded at stations located with both high and low anthropogenic loads.

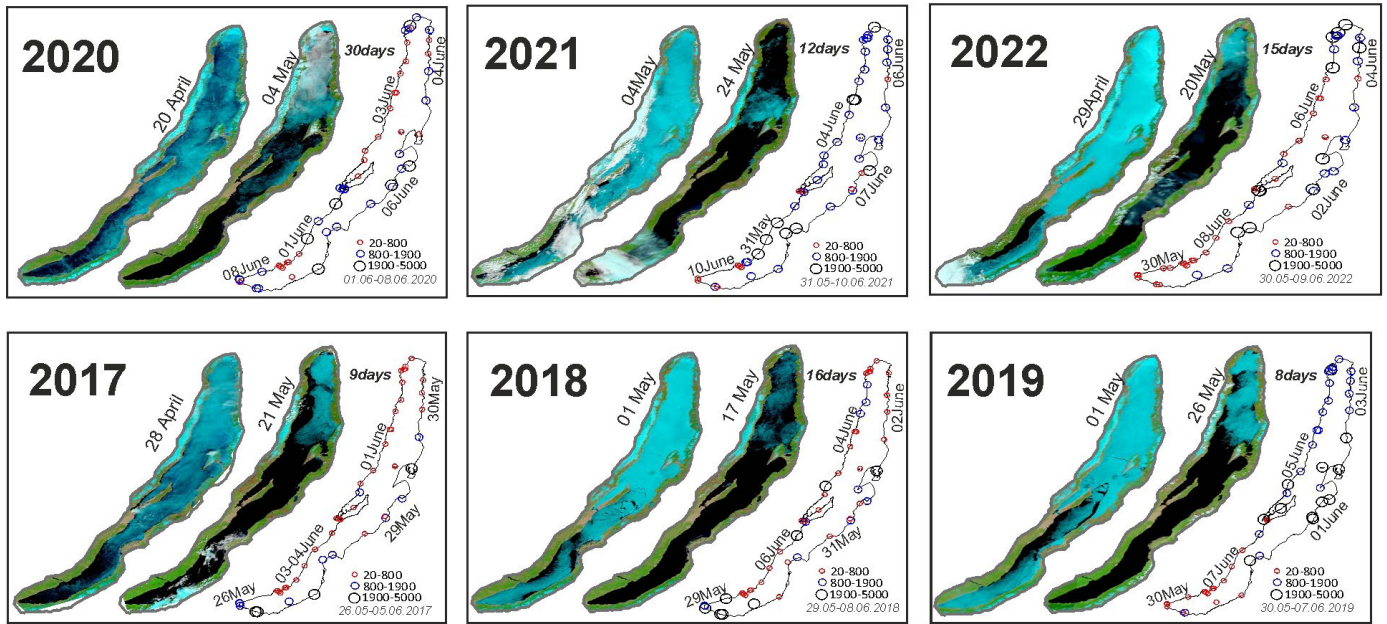
The high biomass values have stations of group 4 and st. Baikalsk, Babushkin and Sv. Nos (Fig. 3).

It was tested relationship between the duration of the ice-free period at the time of sampling and phytoplankton biomass (Fig. 4). In all cases, at the beginning of the expedition, the Southern Basin was without ice cover for about a month and the low biomass values at the southern stations could be explained by the fact that phytoplankton development was in its final stage. However, this was not always the case in the interannual aspect. For example, in 2021, increased biomasses were recorded at the stations of B. Koty, B. Goloustnoye, Peschanka, and Buguldeyka. At the time of sampling, the stations of Northern Baikal were most often without

ice cover for 12-15 days, with a minimum duration of 8 days in 2019 and a maximum duration of 30 days in 2020. However, even with such time variations, there is no unambiguous linear relationship between the values of phytoplankton biomass and from the moment of clearing from ice to sampling. The station of B. Ushkany Island was ice-free for about 8 days in 2019, however, phytoplankton biomass was 3430 mg/m<sup>3</sup>. For instance, the most frequently recorded values of phytoplankton biomass for this station were in the range of 360-550 mg/m<sup>3</sup>.

The physiological state of the algal community can be expressed by pheophytin. Pheophytin is primary product of chlorophyll breakdown. Aging or decay of chloroplasts leads to the destruction of chlorophyll, the Mg<sup>2+</sup> ion is lost, which leads to the formation of pheophytin. Thus, the ratio of chlorophyll-*a* to pheophytin (chl-*a*/pheo.) is less than 1, indicating the death and decomposition of algae community (Britton, 1986).

The distribution of the chl-*a*/pheo. index at stations in 2021 was a very strange (Fig. 5). Thus, the stations of Southern and Middle Baikal, despite the fact that at the time of sampling they were ice-free conditions for 26-36 days, had high values of this index, which indicates a “young” phytoplankton community. At that time, at the stations of Northern Baikal, which had been in ice-free conditions for about 12 days, this



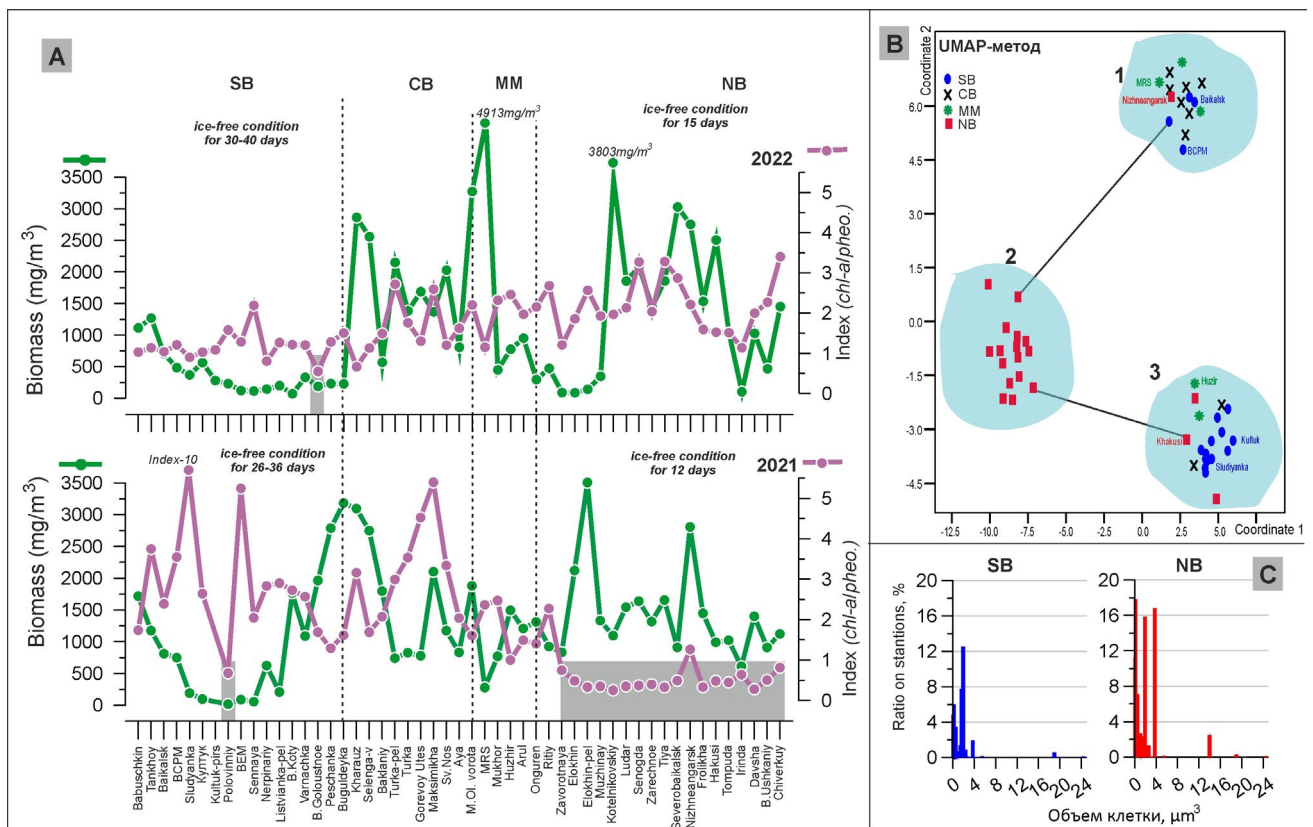
**Fig.4.** State of ice cover at the time of breaking up of the Southern (left image) and Northern (right image) basins of Lake Baikal. Horizontal name “days” - the number of days during which the Northern Baikal was ice-free at the time of the expedition. The diagram shows the biomasses at the stations and the date of sampling.

index was below 1, which indicates an “old” community, although the phytoplankton biomass was high.

This could be explained by the fact that in the Southern and Central Baikal small-celled forms of phytoplankton prevailed, with a high rate of cell division and quickly producing a “young community” with low biomass. While in the Northern Baikal large-celled forms dominated. However, the analysis of the phytoplankton

size in the Southern and Northern Baikal shows that the main dominant in both cases were small-celled forms with sizes up to  $4 \mu\text{m}^3$  and they were more numerous in the Northern Baikal (Fig. 5). In 2022 such an abnormal distribution of the index was not observed.

If we compare the distribution of all pigment characteristics by stations for 2021-2022 using the UMAP method, we can see three clear clusters (Fig. 5).



**Fig.5.** Panel A – the ratio of biomass (green curve) and the chl-a/phaeo. index (lilac curve). The gray rectangle highlights stations with increased pheophytin values, marking the “old” of the phytoplankton community. Panel B – results of the UMAP method (10 neighbors were searched for, min.dist 0.2). Panel C – Distribution of phytoplankton by cell volume. Abbreviations in all panels – Northern Baikal (NB), Southern Baikal (SB), Central Baikal (CB), Maloye More Strait (MM).



However, only cluster 2 is represented by stations belonging to one Northern Basin. Clusters 1 and 3 are represented by stations from all three basins and the Maloye More Strait, and one cluster contains stations that are extremely remote from each other. For example, Khakusy and Kultuk stations in cluster 3, or BCPM and N. Angarsk stations in cluster 1. It should be noted that the stations of clusters 1 and 2 are extremely dissimilar in pigment characteristics, although they are geographically close. For example, BCPM (cluster 1) and Slyudyanka (cluster 3).

Thus, there is any clear evidence that the duration of the ice-free period in spring is a key factor in the development of spring phytoplankton.

According to the cell number, the dominants are diatoms (42%), green algae (26%) and haptophyta (20%) (Fig. 2). The average number of diatoms in groups 1, 2, 3 and 4 was 598, 346, 299 and 1091 thousand cells/L, respectively. The maximum number (9768 thousand cells/L) among diatoms was *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve, Möller at st. Selenga-vikhod in 2021. The average number of green algae in groups 1, 2, 3 and 4 was 284, 253, 95 and 865.5 thousand cells /L, respectively. The maximum number (7968 thousand cells/L) was shown by *Dictyosphaerium* sp. at st. Chivyrkuisky Bay in 2022. The average abundance of haptophyta in groups 1, 2, 3 and 4 was 228, 265, 172 and 464 thousand cells/L, respectively. The maximum abundance (5000 thousand cells/L) among haptophytes was *Chrysochromulina parva* Lackey at st. Maksimikha in 2020. The average abundance of blue-green algae did not exceed 12.8 thousand cells/L, cryptophytes - 343 thousand cells/L, dinophytes - 15.6 thousand cells/L and euglenophytes - 0.2 thousand cells/L. Phytoplankton was most abundant at the stations of group 4 (Fig. 2).

The species composition at the stations is not very rich. The most common stations are those with 15-22 species. The minimum number of species (3) was

at st. Sennaya in 2017. The highest values of species diversity (40-45 species) were found at stations located in the Selenga delta area. The species diversity of stations in groups 1-3 is comparable, but outliers from the average value are more often observed at stations in group 1 (Fig. 6). Stations in group 4 are characterized by the highest species diversity.

If it considers the average long-term values, the stations are divided into three classes in which the number of species is 13-19, 20-26 and 27-41. Stations of the first class are numerically dominant. They are most often found in South Baikal and along the western coast of North Baikal (Fig. 6). Using the Simpson and Shannon indices shows that there are no significant differences all four groups (Fig. 6) in the long-term aspect. Although the distribution of the Simpson index for stations of group 1 is shifted to low values, indicating that in some years one species dominated at the stations. The mean values of these indices for a series of 2017-2022 show that most stations in the southern and central basins are characterized by low species diversity with a predominance of some species at the station.

A total 16 species cyanobacteria were identified, *Anabaena* Bornet & Flahault (5 species and one sp.), *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Gloeocapsa limnetica* (Lemmermann) Hollerbach, *Gomphosphaeria lacustris* Chodat, *Lyngbya limnetica* (Campbell), *Anagnostidis*, *Marsoniella elegans* Lemmermann, *Merismopedia tenuissima* Lemmermann, *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont (three sp.), *Phormidium* Kützing ex Gomont (one sp.). *Anabaena* sp., is the absolute dominant species, with an mean content 8.3, 11.5, 16.7 and 23.9% in group 1, 2, 3 and 4, respectively. *L. limnetica* is a subdominant species, with an average content of 5.8% in group 4 (see Table 2).

Assemblage of haptophyta algae is presented by *Ch. parva*. and Chrisophytes algae are presented by 11 species: *Chromulina* sp., *Ch. melosirae*, *Chryso-sphaerella baicalensis* Popovskaya, *Dinobryon bavaricum* Imhof,

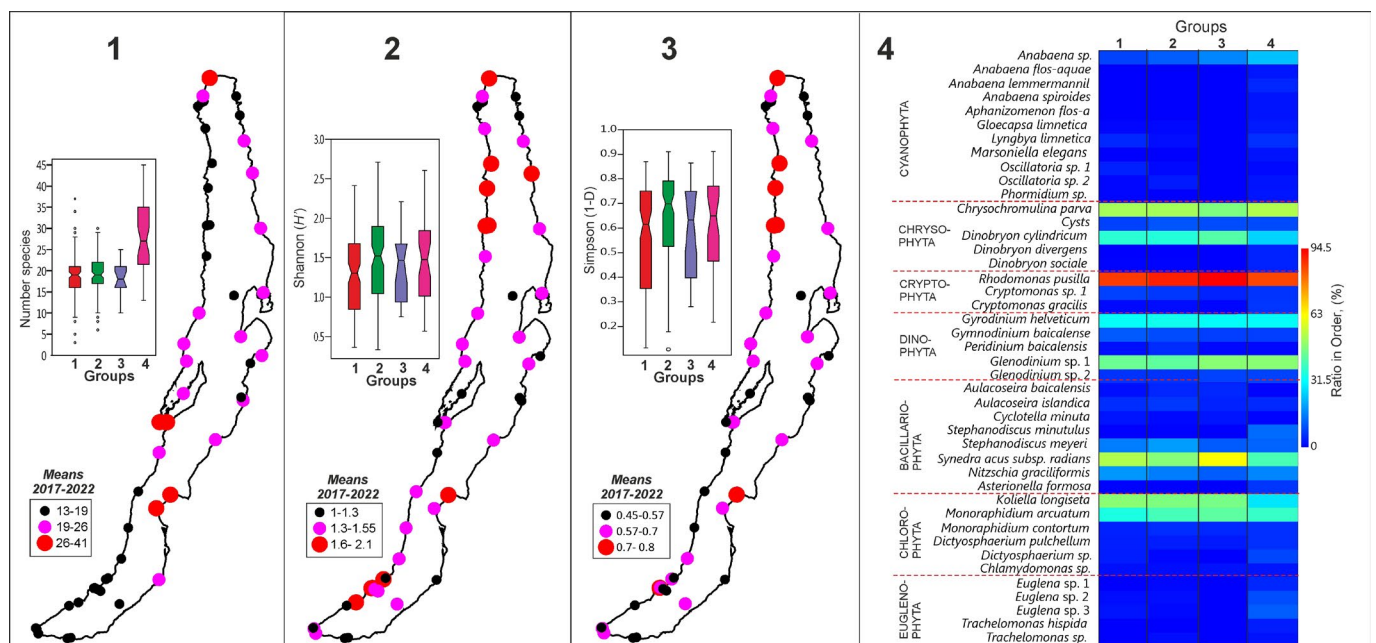


Fig.6. Species diversity of phytoplankton. 1 - number of species at stations, 2 - Shannon index, 3 - Simpson index, 4 - average long-term share of species in its Orders (only dominant species, whose abundance is more than 4% in the department, are shown).

**Table 2.** Numerical characteristics of the species composition of spring phytoplankton in 2017-2022.

Species	Quantity (thousand cells/L)												Biomass (mg/m <sup>3</sup> )											
	Group-1			Group-2			Group-3			Group-4			Group-1			Group-2			Group-3			Group-4		
	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max
<i>Anabaena</i> sp.	9	7	563	0.52	1.6	32	0.14	1.1	16	0.2	5	34	1.1	0.9	75.2	0.1	0.2	4.2	0.02	0.14	2.08	0.026	0.7	4.4
<i>Anabaena flos-aquae</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1.3	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.63	0.1	3.8
<i>Anabaena lemmermannii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0.6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1615	0.1	1.7
<i>Anabaena spiroides</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.8	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.121	0.1	2.3
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	0.02	0.0002	0.02	0	0	0	0	0	0	39	1.0	39	0.0002	1.6E-06	0.0002	0	0	0	0	0	0	0.39	0.01	0.4
<i>Gloeoapsa limnetica</i>	0.08	0.001	0.08	0.08	0.001	0.08	0	0	0	0.1	0.1	2	0.01	5.12E-05	0.006	0.01	5.47E-05	0.01	0	0	0	0.008	0.01	0.2
<i>Lynghya limnetica</i>	0.08	0.4	50	0.38	0.013	1.1	0	0	0	20	2.5	53	0.01	0.05	6	0.04	0.001	0.1	0	0	0	2.2	0.3	5.83
<i>Marssonietta elegans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0.3	11.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.00	0.01
<i>Oscillatoria</i> sp. 1	2.2	1.5	121	0.41	0.09	6.3	0	0	0	0.2	0.005	0.2	0.6	0.4	35	0.12	0.03	1.8	0	0	0	0.06	0.00	0.06
<i>Oscillatoria</i> sp. 2	9	0.1	9	3.2	0.32	18.2	0	0	0	2.3	0.1	2.3	0.9	0.01	1	0.3	0.03	1.8	0	0	0	0.2	0.01	0.23
<i>Oscillatoria</i>	2.4	0.0	2.4	1.1	0.07	7	0	0	0	0	0	0	0.3	0.002	0.3	0.1	0.01	0.8	0	0	0	0	0	0
<i>Chrysochromulina parva</i>	0.23	177.5	5003	0.06	1.39	6135	1.15	86	999	0.09	291	3583	0.01	9	250	0.003	7.0	307	0.1	4	50	0.005	15	179
Cysts	0.09	8.7	233	0.02	25.53	483	0.38	13.1	183	0.15	48	1129	0.045	4	117	0.01	13	242	0.2	7	92	0.1	24	565
<i>Dinobryon cylindricum</i>	0.09	42	402	0.08	99	881	0.3	70.6	470	0.1	87	1374	0.17	79	764	0.152	188	1674	1	134	893	0.2	165	2611
<i>Dinobryon divergens</i>	0.13	0.6	65	0	0	0	0	0	0	0.69	22	340	0.14	0.7	72	0	0	0	0	0	0	0.8	24	374
<i>Dinobryon sociale</i>	0.3	0.2	4.12	0.4	0.43	33	0.73	0.04	0.73	0.59	9	114	0.1	0.0	1	0.1	0.1	8	0.2	0.01	0.2	0.1	2	26
<i>Rhodomonas pusilla</i>	0.38	100.8	2991	0.3	93.19	3681	1.75	51.9	268	0.15	336	3480	0.1	21.2	628	0.1	19.6	773	0.4	11	56	0.0	71	731
<i>Cryptomonas</i> sp. 1	0.07	4.3	149.9	0.13	2.98	31.8	0.1	1.5	18	0.1	9	133	0.112	6.8	240	0.2	4.8	51	0.16	2.3	29	0.2	15	213
<i>Cryptomonas gracilis</i>	0.07	0.7	12.5	0.07	1.55	84	0.52	0.5	3.7	0.09	2	18.2	0.14	1.4	25	0.1	3.1	168	1.04	1.0	7.4	0.2	4	36
<i>Gyrodinium helveticum</i>	0.02	1.8	10.4	0.03	2.02	20.3	0.1	1.8	10	0.1	4	17.4	0.38	33.4	197.6	0.6	38.3	386	1.9	33.3	198	1.9	68	331
<i>Gymnodinium baicalense</i>	0.06	0.7	8.6	0.07	0.51	6.63	0.07	0.5	2.9	0.15	0.9	11	1.224	14.8	175	1.4	10.3	135	1.4	11.1	59	3.1	18	224
<i>Petridinium baicalense</i>	0.06	0.1	2.1	0.08	0.46	26	0.2	0.2	1.18	0.1	0.1	1.8	1.464	3.1	51.24	2.0	11.2	634	4.1	4	29	2.4	2	44

Species	Quantity (thousand cells/L)												Biomass (mg/m <sup>3</sup> )											
	Group-1			Group-2			Group-3			Group-4			Group-1			Group-2			Group-3			Group-4		
	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max
<i>Glenodinium</i> sp. 1	0.1	4.2	193	0.06	3.23	67	0.2	2.6	8	0.68	9	84	0.144	6.1	278	0.1	4.7	96	0.2	4	12	1.0	14	121
<i>Glenodinium</i> sp. 2	0.08	0.4	6.7	0.04	0.43	12	0.2	0.4	4	0.11	1.2	11	0.44	2.0	36.85	0.2	2.4	66	1.0	2.4	22	0.6	6	61
<i>Aulacoseira baicalensis</i>	0.07	2.0	38	0.07	5.05	112	0.04	12.6	192	0.12	1.8	16.5	0.98	27.8	532	1.0	70.7	1568	0.6	176	2688	1.7	25	231
<i>Aulacoseira islandica</i>	0.07	18	312	0.03	15.70	272	0.08	5.5	49	0.15	26	449	0.259	65.2	1153	0.1	58.1	1006	0.3	20	181	0.6	96	1661
<i>Cyclotella minuta</i>	0.06	1.1	48	0.06	0.64	6.1	0.14	1.0	10	0.08	0.4	2.52	0.14	2.5	113	0.1	1.5	14	0.3	2.3	25	0.2	1	6
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.8	6	748	0.26	5.48	624	0.7	0.04	0.7	7.6	413	9768	0.15	1.2	142	0.0	1.0	119	0.1	0.01	0.133	1.4	78	1856
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.1	175	3681	0.1	170.11	2515	0.2	16	155	0.34	95.9	2277	0.10	186	3902	0.1	180.3	2666	0.2	16.6	165	0.4	102	2414
<i>Synedra acus</i> subsp. <i>radicans</i>	0.4	224	1400	0.39	132	1630	0.3	256	1393	0.23	280	1072	0.68	426	2659	0.7	250.9	3097	0.5	486	2647	0.4	533	2037
<i>Synedra ulna</i> var. <i>danica</i>	0.1	1.4	42	0.06	0.80	14	0.08	0.5	5.5	0.15	0.7	3.42	0.20	4.5	138	0.2	2.6	46	0.3	1.7	18	0.5	2.2	11
<i>Synedra acus</i>	0.3	1.0	39	0.24	1.30	93	1.82	0.1	1.82	0.14	5.2	110	0.07	0.2	8	0.05	0.3	19	0.4	0.02	0.4	0.0	1.0	22
<i>Nitzschia graciliformis</i>	0.1	167	5040	0.15	26	806	0.12	5.4	50	0.07	193.1	1740	0.02	36.8	1109	0.03	5.7	177	0.0	1.2	11	0.0	42	383
<i>Asterionella formosa</i>	0.08	0.8	37	0.17	0.42	14.6	0.38	0.2	2.1	0.07	21.6	335	0.05	0.5	24	0.1	0.3	9	0.2	0.1	1.3	0.0	14	214
<i>Koliella longiseta</i>	0.1	157	3520	0.1	147	4449	0.55	33.7	181	0.29	92.6	1480	0.02	37.6	845	0.02	35.2	1068	0.1	8.1	43	0.1	22	355
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	0.36	42	1004	0.2	47	644	0.91	55.7	460	0.15	94.0	606	0.05	6.3	151	0.03	7.1	97	0.1	8.4	69	0.0	14	91
<i>Monoraphidium contortum</i>	0.08	4.4	98	0.08	12	411	0.1	1.9	30.6	0.11	29.4	518	0.01	0.6	13	0.01	1.6	53	0.0	0.2	4	0.0	4	67
<i>Dityosphaerium pulchellum</i>	2.1	60	3900	0.16	19	1980	29	4.1	45	1.9	247.7	9828	0.25	7.2	468	0.02	2.3	238	3.5	0.5	5.4	0.2	30	1179
<i>Dityosphaerium</i> sp.	2.5	19.9	815	2640	23	2640	0	0	0	21	349.2	7968	0.03	0.2	8	26.4	0.2	26	0	0	0	0.2	3.5	80
<i>Chlamydomonas</i> sp.	0.09	0.8	27	0.12	4	364	0.08	0.2	1.1	0.21	5.2	68	0.04	0.3	11	0.05	1.6	149	0.0	0.1	0.5	0.1	2.1	28
<i>Euglena</i> sp. 1	0	0	0	0.08	0.001	0.08	0	0	0	0.15	0.01	0.33	0	0	0	0.50	0.004	0.5	0	0	0	0.9	0.1	2
<i>Euglena</i> sp. 2	0.08	0.001	0.08	0.06	0.003	0.26	0	0	0	0.1	0.05	1.47	0.66	0.01	0.7	0.5	0.02	2.2	0	0	0	0.8	0.4	12
<i>Euglena</i> sp. 3	0.08	0.004	0.26	0.3	0.003	0.3	0	0	0	0.09	0.03	0.25	0.38	0.02	1.2	1.4	0.01	1.4	0	0	0	0.4	0.1	1.2
<i>Trachelomonas hispida</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.03	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0.005	0.1
<i>Trachelomonas</i> sp.	0	0	0	0.05	0.001	0.09	0	0	0	2.43	0.06	2.43	0	0	0	0.05	0.001	0.09	0	0	0	2.4	0.1	2.4



*D. cylindricum*, *D. divergens*, *D. sociale* (Ehrenberg), Ehrenberg, *Dinobryon* sp. 1, *Kephyrion* sp., *Mallomonas vannigera* Asmund, *Synura petersenii* Korshikov, and cysts. *Ch. Parva* and *Dinobryon cylindricum* are dominant with ratio 47-53 and 27-36%, respectively.

The cryptophyte algae included eight species: *Rhodomonas pusilla* (Bachmann) Javornický, *Cryptomonas* sp. 1, sp. 2, *C. erosa* Ehrenberg, *C. gracilis* Skuja, *C. marssonii* Skuja, *C. ovata* Ehrenberg, *C. reflexa* (Marsson) Skuja. *Rh. pusilla* is absolutely dominant 98-100%.

Dinophytes are represented by six species: *Gyrodinium helveticum* (Penard) Takano, Horiguchi, *Gymnodinium baicalense* Antipova, *Peridinium baicalense* Kisselev, Zvetkov, *Peridinium* sp. (euriceps), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2. The rate of *Glenodinium* sp. 1 and *G. helveticum* are 43-48 and 31-34%, respectively.

Diatoms are represented by 27 species: *A. baicalensis*, *A. islandica*, *A. granulata* (Ehrenberg), Simonsen, *Aulacoseira* sp., *Melosira varians* Agardh, *Cyclotella minuta* (Skvortsov) Antipova, *C. baicalensis* Skvortsov, Meyer, 1928, *C. ocellata* Pantocsek, *C. meneghiniana* Kützing, *Cyclostephanos dubius* (Hustedt) Round, *Stephanodiscus minutulus*, *St. hantzschii*, *St. meyeri*, *St. makarovae* Genkal, *Stephanodiscus* sp. 1, *Synedra acus* subsp. *radians* (Kützing) Skabichevskij, *S. ulna* (Nitzsch) Ehrenberg, *S. ulna* var. *danica* (Kützing) Van Heurck, *S. acus* Kützing, *N. graciliformis*, *Nitzschia* sp., *Fragilaria crotonensis* Kitton, *F. capucina* Desmazières, *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing, *Diatoma elongatum* (Lyngbye) Agardh, *Asterionella formosa* Hassall, *Ellerbeckia teres* (Brun) Crawford ex Houk & al., also spores and auxospores. *S. acus* subsp. *radians* (40-63%) is dominant for all groups. However, The minimum and maximum shares were observed to be in the fourth and third groups, respectively. Less abundant (11-19% of diatoms), *N. graciliformis* and *St. meyeri* were identified, while the rate of other diatom species did not exceed 7%, and was often less than 1%.

The most numerous group were green algae (34 species): *Koliella longiseta* (Vischer) Hindák, *Monoraphidium arcuatum* (Korshikov) Hindák, *M. contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *Ankistrodesmus* sp. 1, *Elakatothrix genevensis* (Reverdin) Hindák, *Actinastrum hantzschii* Lagerheim, *Binuclearia lauterbornii* (Schmidle) Proshkina-Lavrenko, *Closterium* sp., *C. ehrenbergii* Meneghini ex Ralfs, *C. moniliferum* Ehrenberg ex Ralfs, *Coelastrum microporum* Nägeli, *Cosmarium* sp., *Dictyosphaerium pulchellum*, *Dictyosphaerium* sp., *Kirchneriella intermedia* Korshikov, *Lagerheimia genevensis* (Chodat) Chodat, *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. duplex* Meyen, *P. tetras* (Ehrenberg) Ralfs, *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat, *S. acuminatus* var. *biseriatus* Reinhard, *S. bijugatus* Kützing, *S. denticulatus* Lagerheim, *S. obliquus* (Turpin) Kützing, *S. quadricauda* Chodat, *S. acuminatus* var. *elongates* Smith, *S. sp.*, *Schroederia setigera* (Schröder) Lemmermann, *Sphaerocystis schroeteri* Chodat, *Staurodesmus* sp., *Oocystis lacustris* Chodat, *Oocystis* sp., *Chlamydomonas* sp., *Volvox aureus* Ehrenberg. Despite species abundance, significant rate of green algae shows *K. longiseta* (28-48%, minimum in group 4), *M. arcuatum* (34-43%,

evenly distributed in the stations), *M. contortum* (4-6%, evenly distributed in the stations), *D. pulchellum* (3-6%, evenly distributed across all groups of stations), and *Dictyosphaerium* sp. with a maximum - 9% in station group 4. The share of other species was less than 3%.

Euglenophyta s were not numerous and were represented by *Euglena* Ehrenberg (three sp.), *Trachelomonas hispida* (Perty) Stein, and *Trachelomonas* sp. They showed the minor abundance in stations group 4 of with mean rate of *Euglena* sp. 2, sp. 3 in 9 and 11%, respectively. All other species had average values of the share less than 5%.

The abundance of phytoplankton at the pelagic stations and the coastal stations located near them (Listvyanka-pel-BEM, Sennaya, Nerpinariy; Turka-pel-Turka; Elokhin-pel-Elokhin) shows that only some species is numerous compare to pelagic stations. For example, at the stations in the area of the settlement of Listvyanka, an excess of the abundance of *Chlamydomonas* sp. is noted by 1.6-13 times, *N. graciliformis* by 3-5 times, *Ch.parva* by 1.5-3 times, *A. baicalensis*, *A. islandica*, *Rh.pusilla*, *S. acus* subsp. *radians*, *K. longiseta* and *D. cylindricum* by no more than 2.5 times. At st. Elokhin, an excess of three times was recorded only for *Glenodinium* sp. 1. At the station of the settlement of Turka, only *Ch. parva* exceeded it by 13 times and *K. longiseta* by 3.8 times. Assuming that the Barguzin River and Barguzin Bay are the source for the spread of phytoplankton to the Central and Northern Baikal, however, it can be deduced that the excess at st. Maksimikha over st. Sv. Nos (Nizhneye Izgolovye Cape) was only three times for *Ch. parva* and *S. acus* subsp. *radians*. The absence of other "markers" of this spread, such as *C. ocellata*, was observed at both stations. In addition, *St. meyeri* was found in the maximum quantity of 1110 thousand cells/L at st. Sv. Nos in 2022. For all other species at the aforementioned stations, the excess was less than two times or absent. Consequently, over a six-year observation period, there was an absence of confirmation for the assumption that "most of the species composition of pelagic phytoplankton in open Baikal does not live, but is present due to the carryover from rivers, sors and bays."

The Jaccard index was used to assess the interannual spatial variability of phytoplankton communities, revealing an unstable species composition. The distribution of the index was closely to normal, when most stations show an index distribution 0.4-0.55, the mean value was 0.47 (Fig. 7). This index indicates that it is not possible to conclude unequivocally that certain groups of stations possess a more stable interannual species composition, while others do not. However, the stations of group 3 exhibited lower interannual variability, while those of group 4 demonstrated higher interannual variability. Stations of the 1st and 2nd groups were characterised by significant changes in the index. To estimate the frequency with which stations with low interannual variability occur, the percentage of occurrence of the index greater than 0.47 was calculated for each station. The distribution of stations was then divided into three classes, according to the percentage of occurrence of index values greater than 0.47,

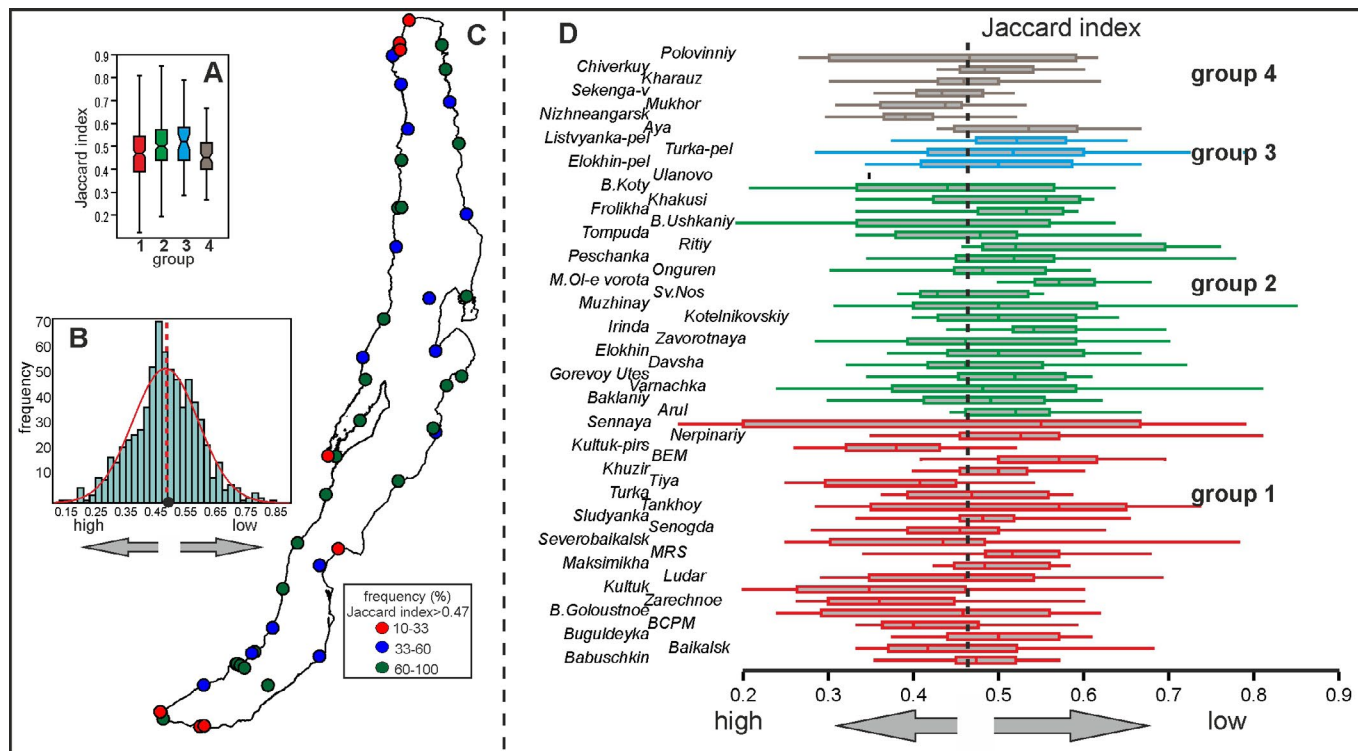


Fig.7. A - distribution of the Jaccard index by groups of stations, B - frequency of occurrence of the Jaccard index, B - percentage of cases when the interannual Jaccard index is greater than 0.47, D - distribution of the Jaccard index at stations.

when: 10-33% (high interannual variability), 33-60% (medium interannual variability), and 60-100% (low interannual variability).

The stations Kultuk, Baikalsk and BCPM, Mukhor, Selenga-v, Nizhneangarsk, Severobaikalsk, Tyia and Senogda are characterized by high interannual variability (Fig. 7). The stations M. Olkhonskiye vorota, BEM, MRS, Ritiy, Listvyanka-pel and Frolikha show the most stable interannual species composition. It should be noted that two geographically close stations near the settlement of Kultuk had a 20% occurrence of the index > 0.47, while at the station Slyudyanka located 5 km away from Kultuk, this occurrence was 73%.

If we consider the species composition by their association with the lake basins, we can see that South Baikal is separated from the others. Most of the stations in North Baikal, located north of Zavorotnaya station, are also isolated (Fig. 8). However, the stations in Central Baikal, by their species composition, are similar to some stations in North Baikal and Maloye More, forming a dense cluster of the following stations: Turka-pel, Turka, Baklaniy, Aya, Gorevoy Utes, Maksimikha, Sv. Nos, Arul, Onguren, Ryty and Davsha.

If we consider the differences in species composition between group station, it can see that the stations of group 4: Polovinny, Selenga-v, N. Angarsk and Mukhor differ from the others (Fig. 8). The stations of group 1: Sennaya, B. Goloustnoye, MRS, Kultuk, Slyudyanka, and from the group 2 st. Ulanovo have some species individuality (Fig. 8). While other stations of all groups form slightly distinguishable “clusters” in which stations of groups 1 and 2 can be located nearby. In addition, the “rooted cluster” method also demonstrates minor differences between phytoplankton compositions of group 1 and 2 (Fig. 8). For example, the species composition of the Elokhin station is close to the composition of phytoplankton at the Kultuk,

Slyudyanka, Baikalsk stations, and the Khuzhir station is close in species composition to the Irinda, Khakusy, etc. stations (Fig. 8).

Moreover, if it conducts a correlation analysis by years, even more diverse correlation relationships can be found. Fig. 8 shows the correlation coefficients ( $r > 0.5$ ) of st. Slyudyanka with other stations. Thus, there was a close correlation with stations without anthropogenic load Aya, Arul, Baklaniy, Onguren, B. Ushkaniy, Polovinny in 2018. In different years, the set of correlating stations is different. For example, in 2019, the Slyudyanka station had high correlations only with 4 stations, and in 2020 already with 34 stations.

The average long-term relationships between groups of stations for types of small-cell phytoplankton, which are considered indicators of eutrophication of water bodies, were also tested, namely content: *Anabaena* sp., *A. flos-aquae*, *Anabaena macrospora* Klebahn, *Anabaena scheremetievi* Elenkin, *L. limnetica*, *Oscillatoria* sp. 3, *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *D. sociale*, *R. pusilla*, *Cryptomonas* sp. 1, *Cryptomonas* sp. 2, *C. gracilis*, *C. marssonii*, *C. ovata*, *C. reflexa*, *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, *Glenodinium* sp. 2, *Stephanodiscus minutulus*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Stephanodiscus* sp. 1, *K. longiseta*, *M. arcuatum*, *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp. 1, *Euglena* sp. 2, *Euglena* sp. 3, *T. hispida*, *Trachelomonas* sp.

In small-cell phytoplankton communities, mean long-term differences were found at the stations of Nizhneangarsk, Severobaikalsk, Tyia, Kharauz, Selenga-v., B. Goloustnoye, Sv. Nos, Davsha, MRS and Mukhor. The differences for other stations all groups are not pronounced (Fig. 9).

In June 2013, green algae of the genus *Chlamydomonas* were recorded in 100 thousand cells/L at the Kultuk and Slyudyanka stations, up to 23 thousand cells/L at the Listvyanka settlement and 56-140



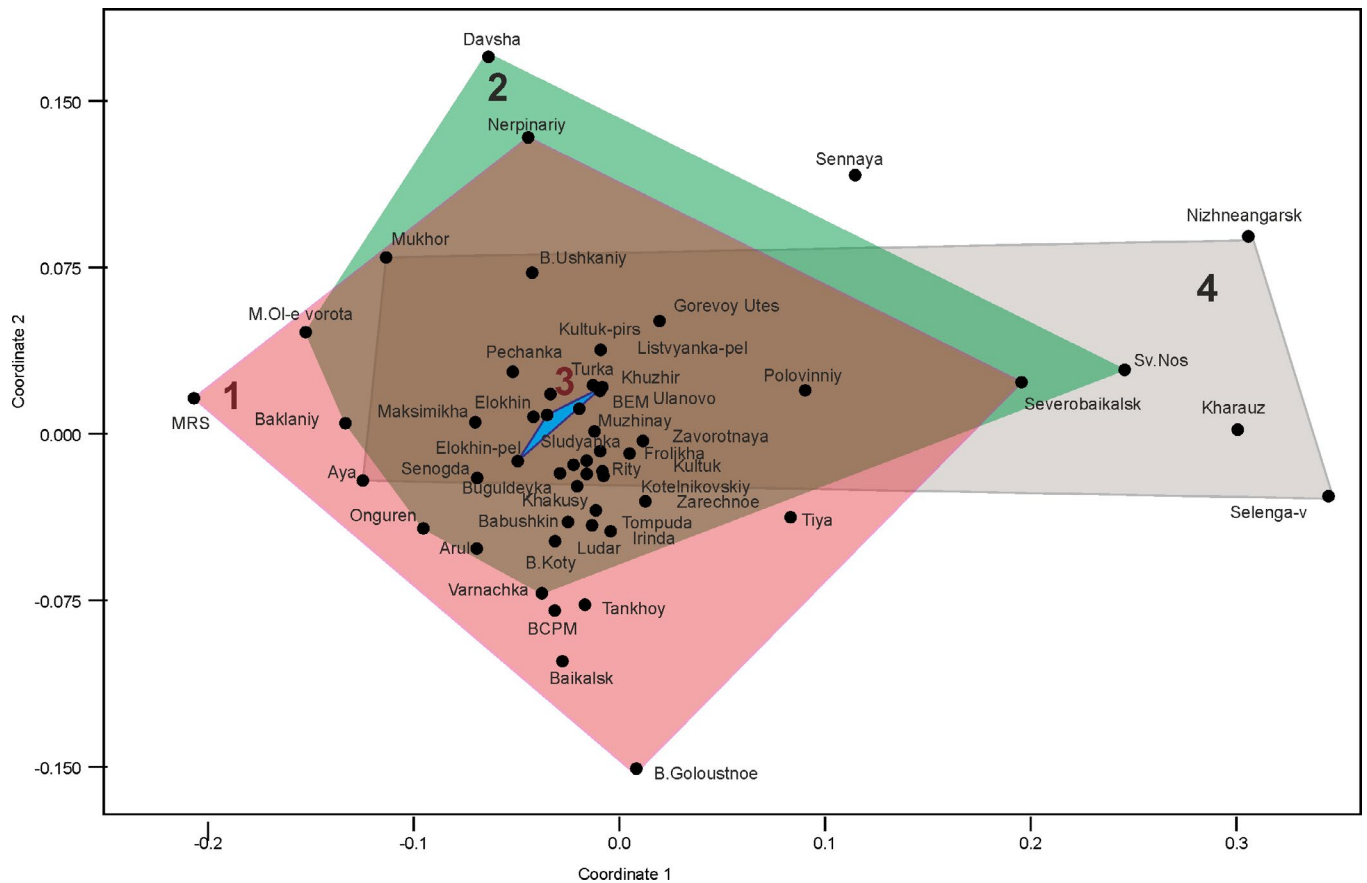


Fig.9. Distribution of spring small-cell phytoplankton (nMSD method). The numbers indicate the groups of stations.

thousand cells/l in the B. Koty settlement, in the Central and North Baikal 1-10 thousand cells/L (Bondarenko and Logacheva, 2016). In our studies, from the entire series of observations (301 stations), a high number of *Chlamydomonas* sp. was recorded only in 3% of cases at the stations: Davsha (2017) - 363, Mukhor (2019) - 68, Kharauz (2019) - 55, Nizhneangarsk (2020) - 45, M. Olkhonskie\_vorota (2017) - 31.2, Nerpinariy (2017) - 26.9, Senogda (2017) - 19.3, B. Ushkaniy (2017) - 15.5 and Olkhonskie\_vorota (2021) - 9.2 thousand cells/L. High values of the abundance of *Chlamydomonas* sp. occurred in 2017. At 239 stations (79%), the abundance of *Chlamydomonas* sp. was less than 1 thousand cells/L. At the B. Koty station, during the under-ice bloom in 2015, its abundance reached 7 million cells/L (Bondarenko and Logacheva, 2016), and most likely, the high abundance of *Chlamydomonas* sp. at the Davsha station in 2017 can be explained by a residual phenomenon after the under-ice bloom. At the Kultuk, Slyudyanka, and Baikalsk stations, their abundance was no higher than 0.7 thousand cells/L, and often they were completely absent. Thus, we do not find evidence that in the spring, *Chlamydomonas* sp. develops en masse in the littoral zone, especially in areas with a high anthropogenic loads.

An analysis of the distribution of nanoplanktonic forms of dinoflagellates *Peridinium* sp. and *Glenodinium* sp. 1, sp. 2 was also carried out. In the interannual distribution, *Peridinium* sp. (at no more than 30% of stations) and *Glenodinium* sp. 2 are characterized by the lowest frequency of occurrence, while in some years they were absent (Fig. 10). The abundance of these species is low, with an average long-term content of 0.8 thousand cells/L, for the exception of the Maloe More stations.

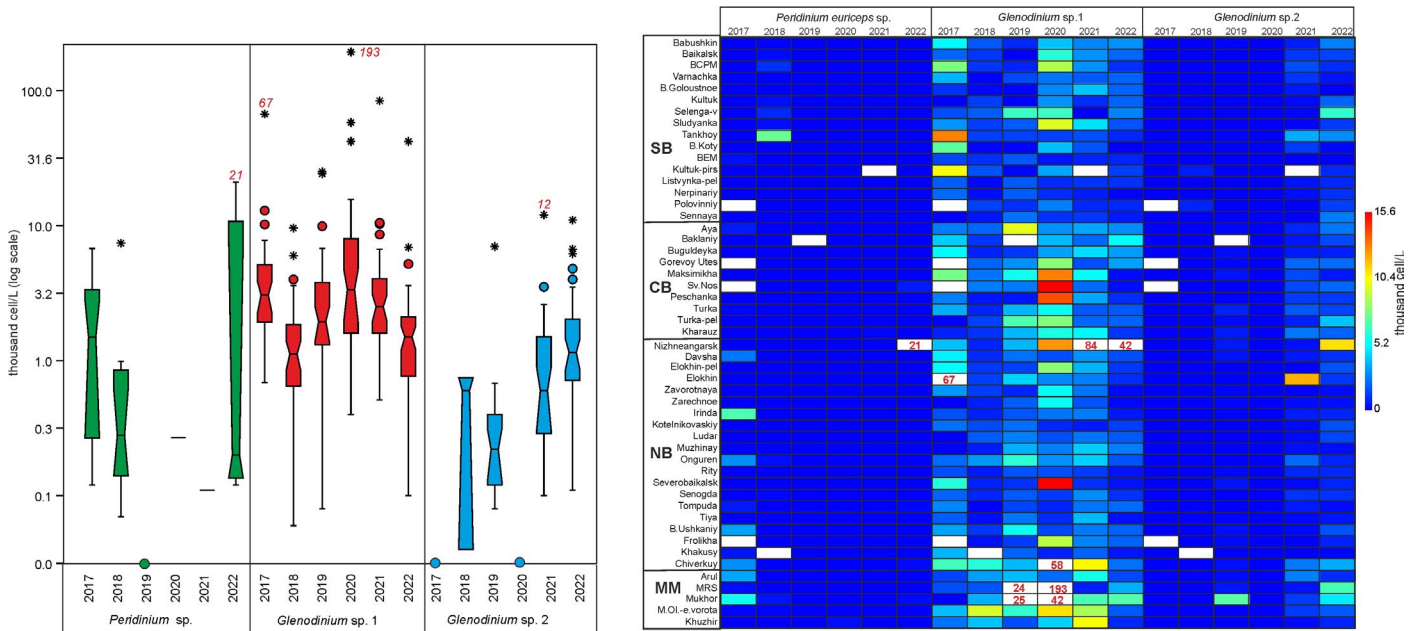
The maximum abundance was noted for *Peridinium* sp. (21 thousand cells/L) at st. Nizhneangarsk in 2022, and for *Glenodinium* sp. 2 (12 thousand cells/L) at st. Elokhin in 2021. The absolute dominant, both in frequency of occurrence (90-100%) and in abundance, is *Glenodinium* sp. 1 (Fig. 10). The maximum observed abundance of 193 thousand cells/L was at st. MRS in 2020. High abundance of *Glenodinium* sp. 1 is typical for the Maloye More stations, st. Nizhneangarsk and Elokhin - 84 and 67 thousand cells/l, respectively. But even taking into account these high values, the mean long-term abundance of *Glenodinium* sp. 1 was 4.4 thousand cells/L.

If it considers the average long-term values of the number of these three types of dinoflagellates at all stations, then the cluster analysis identifies three groups of stations. The first group includes stations with a high number of dinoflagellates. These include the stations MRS, Elokhin, Chivyrkuy and Nizhneangarsk. The second group includes stations with a number of up to 3 thousand cells/L, and the third group includes stations with extremely low numbers. At the same time, stations with different anthropogenic loads are in all three groups (Fig. 11).

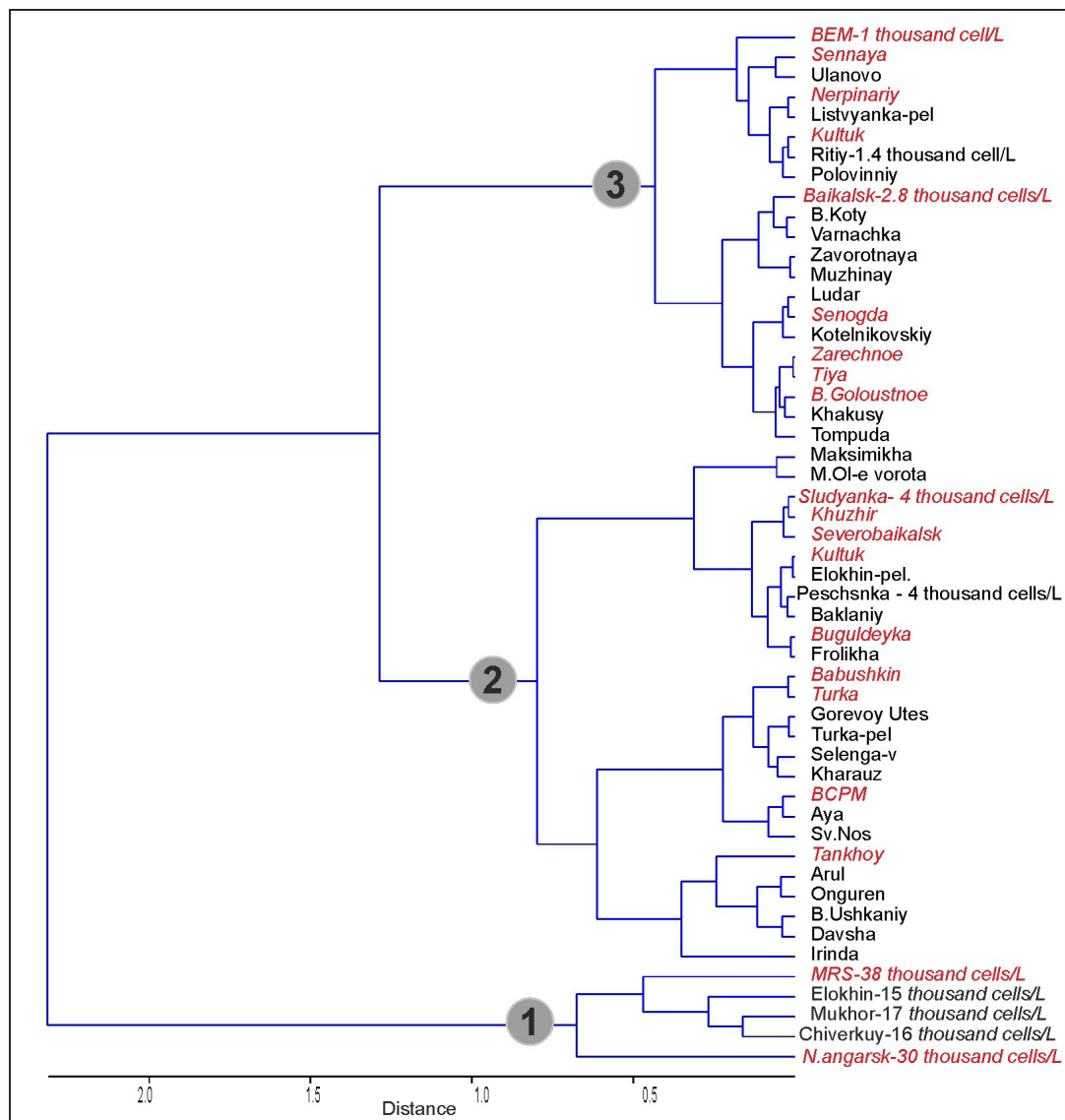
In general, according to obtained data, it seems that parts of the Baikal littoral zone with anthropogenic loads cannot be reliably identified by species composition of the spring phytoplankton.

There are some features in geographic distribution of the main producers of spring phytoplankton biomass *A. baicalensis* and *S. acus* subsp. *radians* (Synedra). Thus, synedra is most abundant in Central Baikal and the southern end between stations Kultuk-Babushkin (Fig. 12). However, over the entire obser-





**Fig.10.** Interannual dynamics of the number of dinoflagellates *Peridinium sp.*, *Glenodinium sp. 1*, sp.2. SB – South Baikal, CB – Central Baikal, SB – North Baikal, MM – Maloe More Strait.



**Fig.11.** Clustering of stations based on the abundance of dinoflagellates *Peridinium sp.*, *Glenodinium sp. 1*, sp.2. Stations of group 1 are in red.



vation period, the maximum number (1630 thousand cells/L) was recorded in 2020 at st. Peschanka. It has been noted that *Synedra* is most abundant for two years in a row, following there is a sharp decline in numbers (Kalyuzhnaya and Antipova, 1974). In our study, a two-year maximum in the number of *Synedra* was also observed at some stations. However, it is important to note that these maxima were not synchronous in different parts of the lake and even within station of the same basin. For example, *Synedra* was abundant between stations Polovinnyy - Babushkin in 2017-2018, while on stations Listvyanka - B. Goloustnoye and in North Baikal (except for the Chivyrkui and Onguren stations), this number was minimal (Fig. 12). In addition, high numbers of *Synedra* were most often observed at the stations in 2020 and 2022.

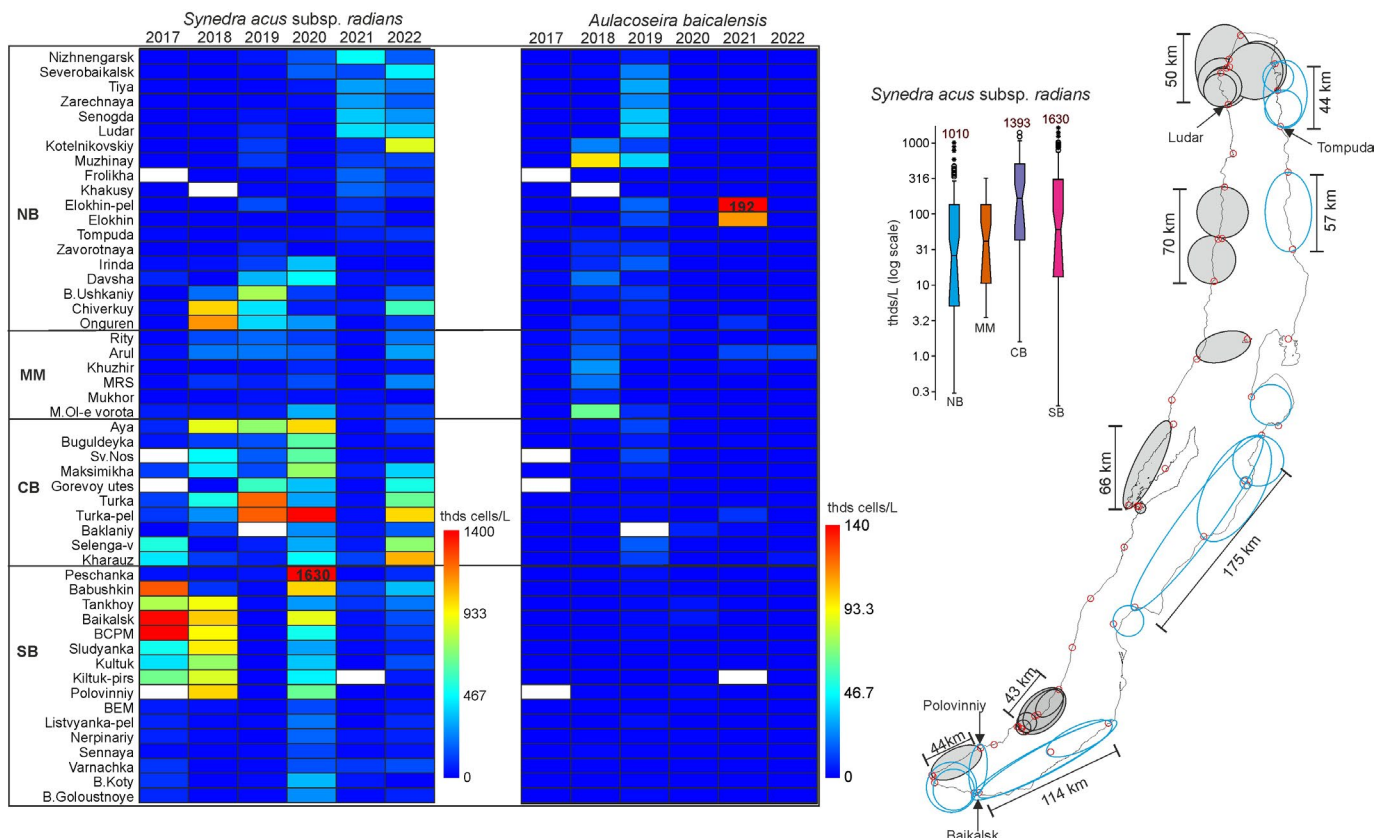
The fluctuations in the abundance of *Synedra* at the stations cannot be explained by the difference in the concentrations of biogenic components at the stations. For example, in 2017, at stations Baikalsk and Senogda, 1387 and 0.7 thousand cells/L were recorded, respectively, while the concentration of  $P_{min}$  was 8 and 5  $\mu\text{g/L}$  and  $N_{min}$  - 68 and 87  $\mu\text{g/L}$  (Bondarenko et al., 2020b).

A weak correlation between the chemical composition and the quantitative values of Baikal phytoplankton was noted earlier (Pomazkina et al., 2010, Popovskaya et al., 2015).

We will not be able to correctly compare the obtained data with the study of the last century, because an integral abundance and biomass for the water layer of 0-25 m were reported early. However,

some data are provided in a comparative aspect from 1964-1969 (Votintsev et al., 1975). Thus, in the northern basin it fluctuated from 0.1 to 56 thousand cells/L, and now from 8.2 to 209 thousand cells/L, although at some stations it could be 0.3-0.4 thousand cells/L. In the central basin from 3 to 57.8 thousand cells/L, and now 35 to 608 thousand cells/L, and in the southern basin from 0.1 to 699 and from 7.4 to 489 thousand cells/L, respectively, during these periods. Moreover, the maximum number of 1080 thousand cells/L was recorded in June 1969, and now values of 1100-1400 thousand cells/L are not uncommon (Fig. 12).

Based on the correlation analysis, the geographically extent when there is a high correlation ( $r > 0.6$ ) from station to station in the distribution of *Synedra* is tested. Fig. 12 shows the distribution of this correlation pattern. Thus, *Synedra* develops most similarly at the northern end of the lake between the Ludar - Tompuda stations, and at the southern end between the Baikalsk-Polovinnyy stations. At the same time, high correlation connections exist between the stations of the western and eastern coasts. For example, the Tyya and Zarechnoye stations correlate with the Khakusy and Frolikha stations, and Baikalsk with the Polovinnyy station. Along the western coast, *Synedra* develops synchronously in the areas between the Muzhinay-Zavorotnaya, Rity - B. Ushkaniy, Arul - M.OI-e vorota and Listvyanka - B. Goloustnoye stations. Along the eastern coast these are the sections Davsha - Irinda, Maksimikha - Sv.Nos, and further in the southern direction all the stations in the Central and South Baikal form “*synedra* fields” in 175 and 114 km, respectively (Fig. 12).



**Fig.12.** Distribution of the abundance of *Synedra acus* subsp. *radians* and *Aulacoseira baicalensis* at stations. SB - South Baikal, CB - Central Baikal, NB - North Baikal, MM - Maloe More. On the right map-scheme, adjacent stations with a high correlation  $r > 0.6$  in the distribution of the abundance of *Synedra acus* subsp. *radians* are connected.

Such uniform distribution of *Synedra* along the eastern coast in the South and Central Baikal is most likely explained by a flatter relief, which results in more uniform hydrodynamic conditions over large areas.

*A. baicalensis* was present in minor quantities at almost all stations during the study period, most often with zero values or no more than 3 thousand cells/L. At the same time, it was most often noted in the Small Sea and Northern Baikal (Fig. 12).

### 3.2. Autumn phytoplankton

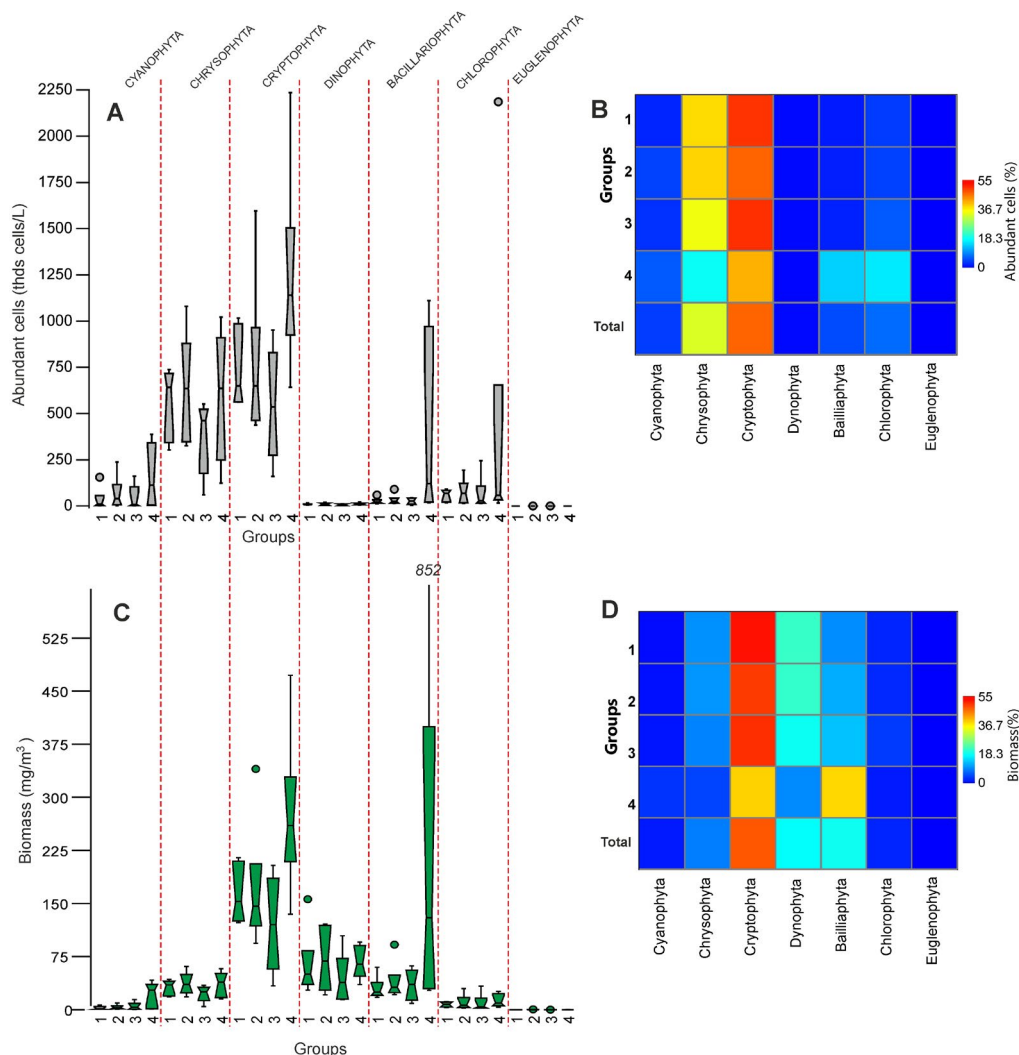
#### *Species composition, diversity and biomass*

It can be noted that in all groups, the highest numbers and biomass were found in Cryptophyte algae, when these indices could reach 2235 thousand cells/L and 472 mg/m<sup>3</sup>, respectively (Fig. 13). In phytoplankton communities, Cryptophyte algae accounted for up to 45.5%. Haptophyta, with a high number of up to 1000 thousand cells/L, is characterized a small biomass, often below 50 mg/m<sup>3</sup>. In contrast, Dinophyte species, with a low number, yielded a biomass of 50-100 mg/m<sup>3</sup> (up to 16% of the total biomass). For diatoms, high values of these indices are typical only for the fourth group of stations. The contribution of Cyanobacteria (2.2% of biomass), Chlorophyta (2.5% of biomass) and Euglenophyte (<1% of biomass) algae to the phyto-

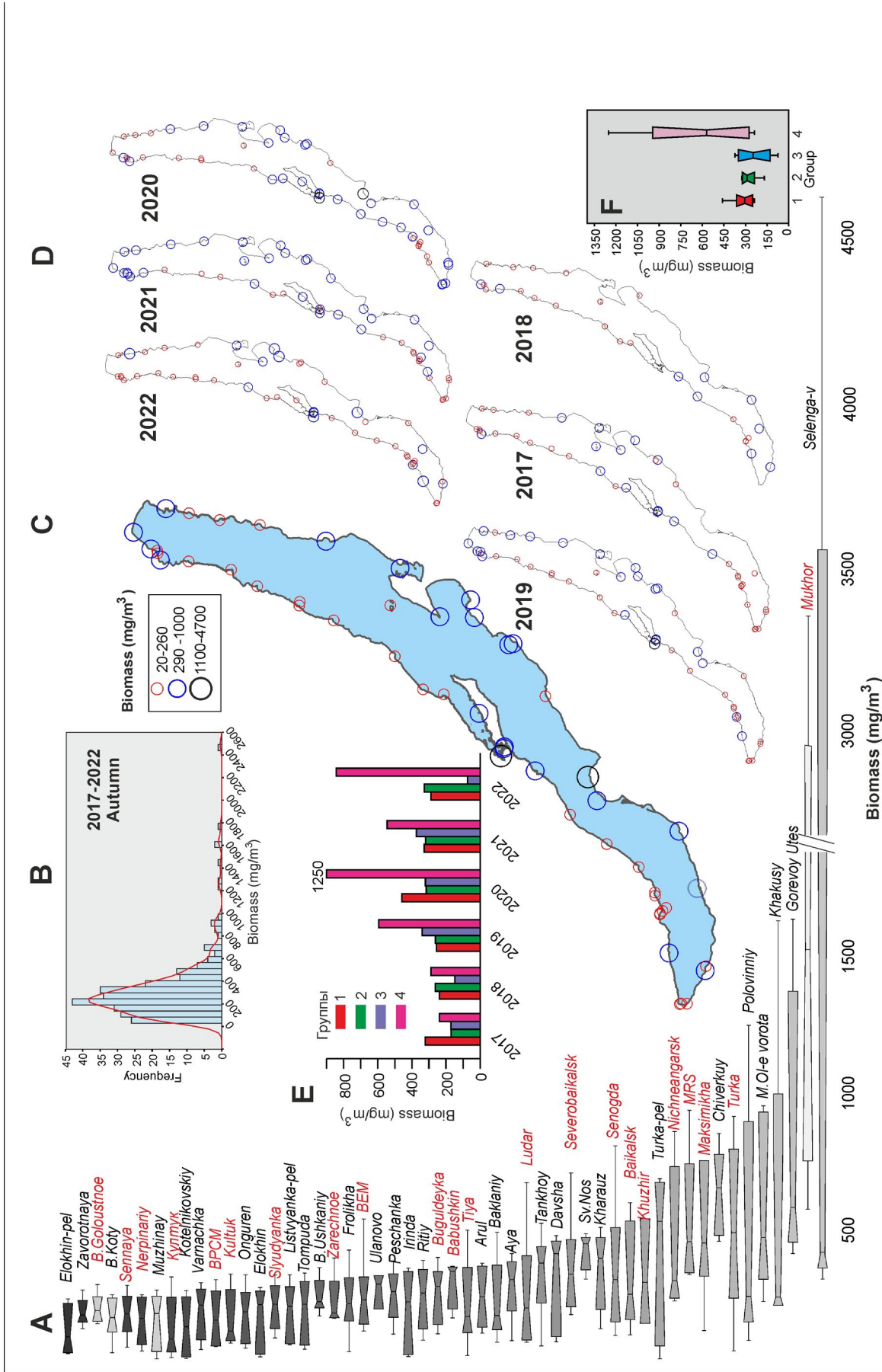
plankton biomass is not high (Fig. 13). Thus, according to abundance, the autumn phytoplankton of the littoral zone of Lake Baikal can be characterized by the dominant community of Haptophyta-Cryptophyte algae, while according to biomass as a community of Cryptophyte algae.

The often occurred biomass was 260-300 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 14). The greatest variability of biomass values is shown by stations of group 4. For example, in the delta of the Selenga River, the biomass varied from 350 to 4700 mg/m<sup>3</sup> between years. The stations can be characterized by distribution of biomass based on the K-medoids as: 20-260, 290-1000 and 1100-4700 mg/m<sup>3</sup>. Average biomass values in the range of 20-260 mg/m<sup>3</sup> are characteristic of most stations in the littoral zone of Lake Baikal (Fig. 14). However, in some years, stations on the east coast had a higher phytoplankton biomass compared to stations on the west coast, for example, in 2021.

In the interannual dynamics, the biomass of stations of groups 1, 2 and 3 do not show strong variability, with the average values are in 240-315 mg/m<sup>3</sup>. There is no differences in the biomass of phytoplankton from water areas located near settlements and low anthropogenic load. For example, the phytoplankton biomass at the stations of Elokhin-pel, Listvyanka-pel (group 3), Zavorotnaya, B. Koty, Kotelnikovskiy, Muzhinay



**Fig.13.** Autumn phytoplankton 2017-2022. Distribution of abundance (A) and biomass of phytoplankton (C) at stations of different groups. Panels B and D reflect the average value of the proportion of phytoplankton divisions.



**Fig. 14.** Distribution of autumn phytoplankton biomass. A - at individual stations for 2017-2022, B - frequency of phytoplankton biomass distribution, C - average biomass values for the observation period 2017-2022 and in individual years (D). E - average biomass distribution at stations belonging to different groups. F - biomass distribution at stations belonging to different groups for the entire observation period.

(group 2) and Listvyanka (Sennaya, Nerpinary), Kultuk, Slyudyanka, BPCM (group 1) were minimal between all observation stations (Fig. 14).

Over the entire observation period, the minimum and maximum numbers of species were 11 and 50, respectively (Fig. 15). Stations were divided into three varieties inherent to species diversity. Thus, the first is stations with 17-22 species, the second is stations with 22-26 species, and the third is stations with 26-36 species. According to this gradation, the stations of the South Baikal and the western coast of the North Baikal to Cape Kotelnikovskiy are less taxonomically diverse (Fig. 15). The use of the Simpson and Shannon indices shows that in terms of species diversity and dominance, no significant differences are revealed between all four groups (Fig. 15) in the long-term aspect. The average values of these indices for the period 2017-2022 show that most stations of South and Central Baikal are characterized by low species diversity with a predominance of only a few species per station. The stations of the North Baikal are more diverse and have a more "even" distribution of the number of species (Fig. 15). The number of species in groups 1 and 2 is almost identical, and higher rates of taxonomic diversity are characteristic of the stations of group 4.

Despite the abundance of species composition, the number of dominant species (in terms of abundance) is not too large (Fig. 15). The numerical characteristics of species with an occurrence of more than 2% are presented in Table 3. Thus, among cyanobacteria, 22 taxa were identified, belonging to the genera: *Anabaena* (4 species, 1 sp.), *Aphanizomenon* (1 species), *Gloeocapsa* (2 species, 1 sp.), *Gomphosphaeria* (1 species), *Lyngbya* (1 species), *Marssoniiella* (1 species), *Merismopedia* (3 species), *Microcystis* (1 species), *Oscillatoria* (3 sp.), *Phormidium* (1 sp.), *Tetrapedia* Reinsch (1 sp.) *Microcystis pulvereae* (Wood) Forti, (11-24%), *A. spiroides* Klebahn (5-19%) and *A. lemmermannii* Richter (8-19%) are dominant.

Chrysophytes algae were presented by 10 species from *Chrysochromulina* (2 species), *Dinobryon* (4 species), *Mallomonas* (1 species, 1 sp.), *Synura* (1 species, 1 sp.) and cysts. Haptophyta -*Ch. parva* (93-97%) is absolutely dominant.

Cryptophytic was presented *Rhodomonas* (1 species) and *Cryptomonas* (5 species, 2 sp.), when *Rh. pusilla* (98-100%) is dominant.

Dinophyte algae were even less diverse – 7 species from: *Gyrodinium* (1 species), *Gymnodinium* (1 species), *Peridinium* (1 species, 1 sp.), *Glenodinium* (2 sp.), *Ceratium* Schrank (1 sp.). *Glenodinium* sp. 1 (57-63%) and *Gyrodinium helveticum* (23-30%) are dominant.

Diatom assemblages is presented from 29 species: *Aulacoseira* (3 species, 1 sp.), *Melosira* Agardh (1 species), *Cyclotella* (4 species), *Cyclostephanos* (1 species), *Stephanodiscus* (3 species, 1 sp.), *Synedra* (2 species), *Nitzschia* (1 species, 1 sp.), *Fragilaria* (2 species), *Tabellaria* (1 species), *Diatoma* (1 species), *Asterionella*, *Ellerbeckia*, *Acanthoceras* and *Urosolenia* (1 species), spores and auxisporos. Rates are *C. minuta* (17-35%), *S. acus* subsp. *radians*, *A. formosa* (22-23%), *N. graciliformis* (7-16%) and *Fragilaria crotonensis* (15%, high content in Chiverkuy and Mukhor Bay).

Chlorophyta is presented 38 species from: *Koliella* (1 species), *Monoraphidium* Komárková-Legnerová (2 species), *Elakatothrix* Wille (1 species), *Actinastrum* Lagerheim (1 species), *Binuclearia* Wittrock (1 species), *Closterium* Nitzsch ex Ralfs (3 species), *Coelastrum* Nägeli (1 species), *Cosmarium* Corda ex Ralfs (1 species, 1 sp.), *Crucigenia* Morren (3 species), *Dictyosphaerium* Nägeli (1 species, 1 sp.), *Kirchneriella* (1 species), *Lagerheimia* Chodat, 1895 (1 species), *Pediastrum* Hegewald (4 species), *Scenedesmus* Meyen (6 species, 1 sp.), *Sphaerocystis* Chodat, (1 species), *Staurastrum* (1 sp.), *Oocystis* (1 species, 1 sp.), *Tetraëdron* Kützing (1 species), *Chlamydomonas* (1 sp.), *Chlorella* Beyerinck (1 species). *M. arcuatum* (39-49%) and *K. longiseta* (16-22%) are dominant.

Euglenophyta rare occurred and are presented by only three genera: *Euglena* Ehrenberg (3 sp.), *Phacus* Dujardin (1 species), *Trachelomonas* Ehrenberg (1 sp.). To identification of dominants is not be correct due to their low abundance and rare occurrence.

The Jaccard index from 0.45 to 0.15 is typical for stations with unstable interannual species composition, and vice versa, the stability of the species composition increases at rates from 0.45 to 0.8 (Fig. 16). Examples of stations with high interannual variability of phytoplankton communities are Baikalsk, Kultuk, Frolikha, Tompuda, and low MRS, Mukhor, M. Olkhonskiye Vorota, Buguldeika (Fig. 16). For each station, it was also calculated how often the interannual differences had a Jaccard index greater than 0.45. Based on this calculation, three types of stations were identified. The first type - 23 stations with high interannual stability of the species composition of phytoplankton (60-100% of cases when the Jaccard index was greater than 0.45). The second type - 17 stations with moderate variability of species composition (33-60% of such cases). The third type - 12 stations with extremely unstable interannual composition (10-33%). Thus, most of the studied areas of the littoral are characterized a stable or moderately variable species composition of phytoplankton communities in the interannual aspect (Fig. 16). The least stable phytoplankton composition was found at the stations of North Baikal. The lowest stability rate (10%) was observed at the stations of Elokhin-pel, Zavorotnaya and Baikalsk.

Using the nonparametric scaling method, the possibility of dividing the Baikal basins and four ecological groups based on the species composition of phytoplankton was studied. As follows from Figure 17, most stations have a similar species composition regardless of their geographic location. Although Central Baikal stations, with the exception of Buguldeyka and Aya, are somewhat isolated from other stations. This can be explained by the influence of the Selenga, Turka and Barguzin Rivers, which supply a large amount of organic matter to these areas of the water area. The most distinct species composition was found at Mukhor, Chiverkuy Bay, Maksimikha and Selenga-v stations. The same distribution is characteristic of the four ecological groups, when most stations form one "inseparable cluster" and the isolation of Mukhor, Chiverkuy Bay and Selenga-v stations (Fig. 17).



**Table 3.** Numerical characteristics of the species composition of autumn phytoplankton in 2017-2022.

Species	Quantity (thousand cells/L)												Biomass (mg/m <sup>3</sup> )											
	Group-1			Group-2			Group-3			Group-4			Group-1			Group-2			Group-3			Group-4		
	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max
<i>Anabaena</i> sp.	2.1	0.4	14	0.52	0.5	20	1.8	0.11	1.8	1.7	7.66	114	0.17	0.03	1.1	0.04	0.04	1.6	0.14	0.01	0.14	0.14	0.61	9.12
<i>Anabaena flos-aquae</i>	0.7	1.2	30	0.70	0.7	14.2	2.3	0.14	2.3	0.6	7.06	96	0.11	0.18	4.4	0.11	0.10	2.13	0.35	0.02	0.35	0.09	1.06	14.40
<i>Anabaena lemmermannii</i>	0.19	2.0	80	0.10	2.7	48	0.23	0.58	2.9	0.08	15.29	239	0.04	0.41	16.0	0.02	0.55	9.6	0.05	0.12	0.58	0.02	3.06	47.80
<i>Anabaena scheremetievi</i>	0.34	0.7	16	0.50	2.8	140	0.23	0.90	5	0.66	25	665	0.11	0.23	5.2	0.17	0.93	46	0.08	0.30	1.65	0.22	8.25	219
<i>Anabaena spiroides</i>	0.34	0.8	27	0.34	1.7	60	1.6	2.78	11.2	0.08	19	214.2	0.09	0.21	7.3	0.09	0.45	16.2	0.43	0.75	3.02	0.02	5.08	58
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	3	0.3	10	0.10	0.5	15	2.9	0.18	2.9	0.08	0.19	4	0.04	0.00	0.1	0.00	0.01	0.18	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	4.6	1.3	96	4.30	0.4	9.6	12.8	1.60	12.8	5.5	7.04	180	4	1.12	84	3.78	0.38	8	11	1.41	11.26	4.84	6.20	158
<i>Lyngbya limnetica</i>	1.6	0.5	14	3	0.6	34.2	1.61	0.10	1.61	1.82	1.05	40	0.11	0.03	1.0	0.21	0.04	2	0.11	0.01	0.11	0.13	0.07	2.80
<i>Microcystis puberea</i>	28	29	380	34	51.8	680	40	28	400	30	99	1360	0.11	0.12	1.5	0.14	0.21	2.72	0.16	0.11	1.60	0.12	0.40	5.44
<i>Oscillatoria</i> sp. 1	0.95	0.3	9	2.00	0.7	41.2	1.93	5.37	84	5.19	0.31	7.2	0.16	0.05	1.5	0.34	0.12	7	0.33	0.91	14.28	0.88	0.05	1.22
<i>Oscillatoria</i> sp. 2	5	0.0	5	2.60	0.5	36.9	0	0.00	0	6.2	0.16	6.2	0.52	0.00	0.5	0.27	0.05	4	0.00	0.00	0.00	0.64	0.02	0.64
<i>Oscillatoria</i> sp. 3	1.7	0.0	3	0.75	0.2	12.2	0	0.00	0	0	0.00	0	0.10	0.00	0.2	0.05	0.01	0.732	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Phormidium</i> sp.	1	0.1	6.4	1.00	0.3	5.6	0	0.00	0	0.44	0.85	20	0.34	0.03	2.2	0.34	0.10	2	0.00	0.00	0.00	0.15	0.29	6.73
<i>Tetrapedia retinchiata</i>	0.07	0.0	0.2	0.07	0.0	2.3	0.08	0.02	0.2	0.07	0.04	0.6	0.01	0.00	0.0	0.01	0.01	0.46	0.02	0.00	0.04	0.01	0.01	0.12
<i>Chrysochromulina parva</i>	0.8	545	1901	0.80	522	4094	12	390	998	14.5	542	1725	0.04	27.24	95.1	0.04	26.09	205	0.58	20	50	0.73	27	86
Cysts	0.45	3.2	22	0.15	3.6	28	0.7	5	27.5	0.16	4	24	0.23	1.61	11.0	0.08	1.80	14	0.35	2.54	14	0.08	1.92	12.00
<i>Rhodomonas pusilla</i>	9	715	3608	1.80	629	6358	13	573	1438	16.3	1219	5569	1.89	150	758	0.38	132	1335	3	120	302	3.42	256	1169
<i>Gyrodinium helveticum</i>	0.09	2.3	42	0.08	2.2	11	0.15	1.82	6.9	0.06	2	9.4	1.31	33	613.2	1.17	31.92	161	2	27	101	0.88	34	137
<i>Glennodinium</i> sp. 1	0.3	5.3	26	0.10	5.3	44.8	0.28	4.16	15.4	0.4	7.51	102	0.47	8.34	40.6	0.16	8.30	70	0.44	6	24	0.62	12	159
<i>Glennodinium</i> sp. 2	0.11	0.7	7.5	0.08	0.7	11.2	0.15	0.62	5.6	0.07	0.63	5	0.32	2.09	21.6	0.23	1.92	32	0.43	1.78	16	0.20	1.81	14
<i>Ceratium hirundinella</i>	0.08	0.4	9	0.06	0.3	4.8	0.08	0.23	2.25	0.07	0.36	2.43	4	22	477.0	3.18	18.03	254	4	12	119	4	19	129
<i>Aulacoseira granulata</i>	0.06	1.6	52	0.08	3.8	119	0.11	5.29	39.2	0.07	1.12	16	0.15	4.00	127.9	0.20	9.26	293	0.27	13	96.43	0.17	2.74	39



Species	Quantity (thousand cells/L)												Biomass (mg/m <sup>3</sup> )											
	Group-1			Group-2			Group-3			Group-4			Group-1			Group-2			Group-3			Group-4		
	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max	min	means	max
<i>Cyclotella minuta</i>	0.11	4.4	32.6	0.08	3.2	39	0.22	5	22.1	0.11	3	23.9	0.17	6.90	51.5	0.13	5.01	61	0.35	8	34.92	0.17	4.26	38
<i>Cyclostephanos dubius</i>	0.08	0.1	2.3	0.08	0.2	4	0.08	0.53	4	0.13	50	1920	0.09	0.12	2.6	0.09	0.18	4.48	0.09	0.60	4.48	0.15	55.45	2150
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.08	1.9	70	0.16	1.3	146	1	1.74	24.3	7	242	5904	0.02	0.39	14.8	0.03	0.27	31	0.21	0.37	5.10	1.47	51	1240
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	0.08	0.1	8.1	0.08	0.1	6.5	0.16	0.06	0.58	0.86	33	1230	0.04	0.05	4.1	0.04	0.04	3	0.08	0.03	0.29	0.43	16	615
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.08	0.1	1.5	0.08	0.2	19.1	0.11	0.13	2	0.08	0.88	29	0.07	0.08	1.3	0.07	0.19	16	0.09	0.11	1.68	0.07	0.74	24
<i>Synedra acus subsp. Radians</i>	0.07	3.0	101	0.08	1.4	12.6	0.08	2.14	10	0.15	3	14.4	0.13	5.37	183.8	0.15	2.55	23	0.15	4	18	0.27	4.71	26
<i>Nitzschia graciliformis</i>	0.08	1.8	20	0.07	2.7	35	0.19	1.50	10	0.11	9	115	0.02	0.44	5.0	0.02	0.69	9	0.05	0.38	2.5	0.03	2.15	29
<i>Fragilaria crotonensis</i>	0.08	1.4	70	0.05	3.5	328	0.14	0.20	1.7	0.2	78	2033	0.12	2.15	106	0.08	5.29	492	0.21	0.30	2.6	0.30	117	3050
<i>Asterionella formosa</i>	0.08	11.4	689	0.05	12.0	714	0.09	7.49	50	0.08	15	121	0.06	8.21	496	0.04	8.62	514	0.06	5.39	36	0.06	11	87
<i>Koliella longiseta</i>	0.09	10.7	121	0.08	14.3	179	0.23	12.40	141	0.1	15	260	0.02	1.92	21.8	0.01	2.57	32.22	0.04	2.23	25.38	0.02	3	47
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	0.15	21.6	188	0.07	22.3	423	0.42	51.09	600	0.17	19	133	0.02	2.80	24.4	0.01	2.90	54.99	0.05	6.64	78	0.02	2	17
<i>Monoraphidium contortum</i>	0.08	3.6	98	0.08	2.6	28	0.24	2.08	19.5	0.15	9.09	196	0.01	0.40	10.8	0.01	0.28	3.08	0.03	0.23	2.15	0.02	1.00	22
<i>Elakotothrix genevensis</i>	0.08	0.4	3	0.10	0.4	2.82	0.1	0.35	0.97	0.08	0.74	9.2	0.01	0.05	0.4	0.01	0.05	0.37788	0.01	0.05	0.13	0.01	0.10	1.23
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	0.4	15.3	468	0.27	17.7	1460	2.4	2.41	13	0.7	6.22	48	0.02	0.82	25.3	0.01	0.96	78.84	0.13	0.13	0.71	0.04	0.34	2.59
<i>Dictyosphaerium sp.</i>	460	4.2	460	2.10	0.2	7	0	0.00	0	4.32	432	17280	4.60	0.04	4.6	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	4.32	173
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.1	0.6	6	0.19	0.5	3.8	0.3	0.53	3.5	0.13	1.41	9.6	0.03	0.18	1.9	0.06	0.15	1.178	0.09	0.16	1.09	0.04	0.44	2.98
<i>Scenedesmus sp.</i>	0.28	0.5	21	0.08	1.6	48	0.14	0.12	1.8	0.32	0.48	9	0.06	0.10	4.4	0.02	0.33	10.08	0.03	0.03	0.38	0.07	0.10	1.84
<i>Schroederia setigera</i>	0.13	0.1	2.2	0.06	1.1	58	0.22	0.58	5.7	0.15	0.94	10.2	0.01	0.02	0.2	0.01	0.12	6.38	0.02	0.06	0.63	0.02	0.10	1.12
<i>Chlamydomonas sp.</i>	0.1	1.9	36	0.07	1.2	7.8	0.26	0.93	3.1	0.16	2.05	9.8	0.05	0.92	17.3	0.03	0.58	3.744	0.12	0.45	1.49	0.08	1	4.70
<i>Euglena sp. 1</i>	0.08	0.001	0.08	0.07	0.001	0.09	0	0	0	0.09	0.01	0.11	0.12	0.00	0.1	0.10	0.00	0.1314	0	0	0.00	0.13	0.01	0.16
<i>Euglena sp. 2</i>	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.08	0	0.004	0.16	0	0	0	0	0	0	0.14	0.01	0.14	0.29	0.01	0.29
<i>Euglena sp. 3</i>	0	0	0	4.8	0.04	4.8	0	0	0	0.09	0.005	0.09	0	0	0	11.04	0	11.04	0	0	0	0.21	0.01	0.21
<i>Phacus caudatus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.003	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.22	0.01	0.22

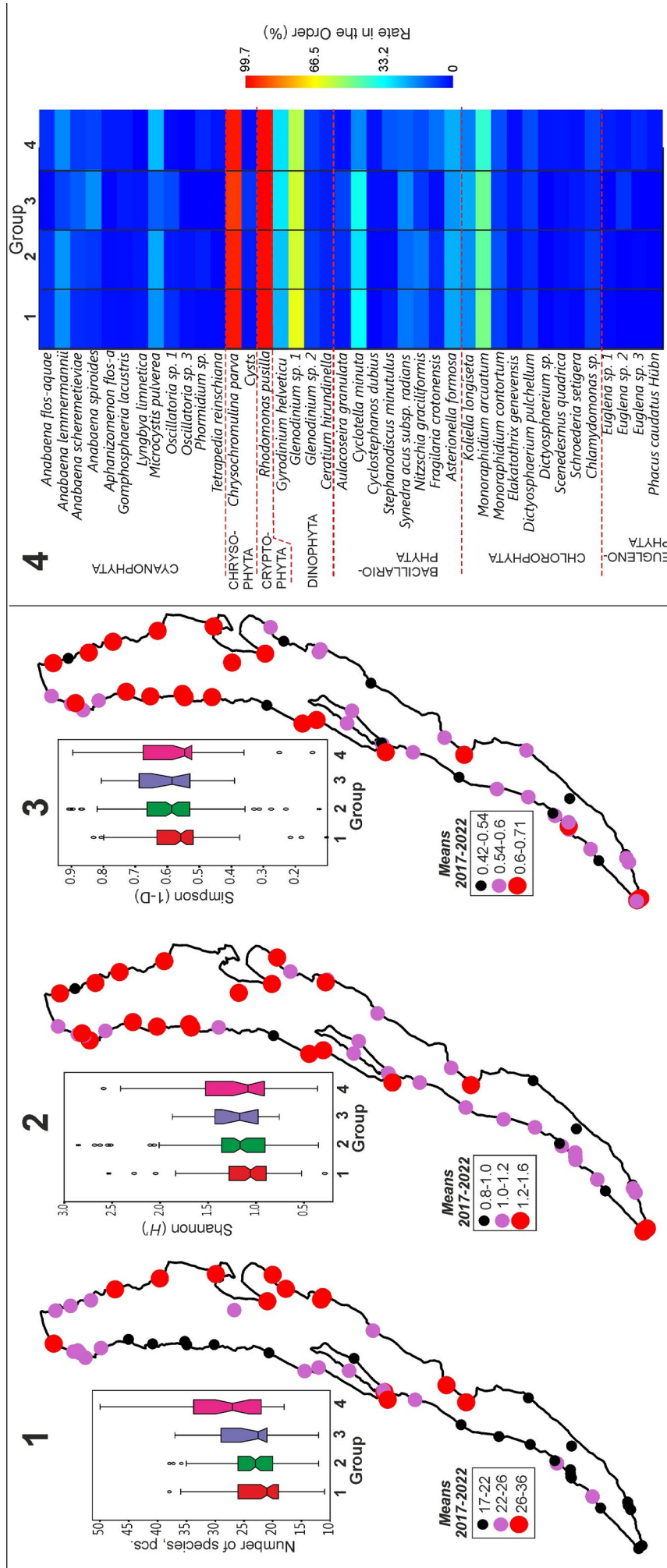
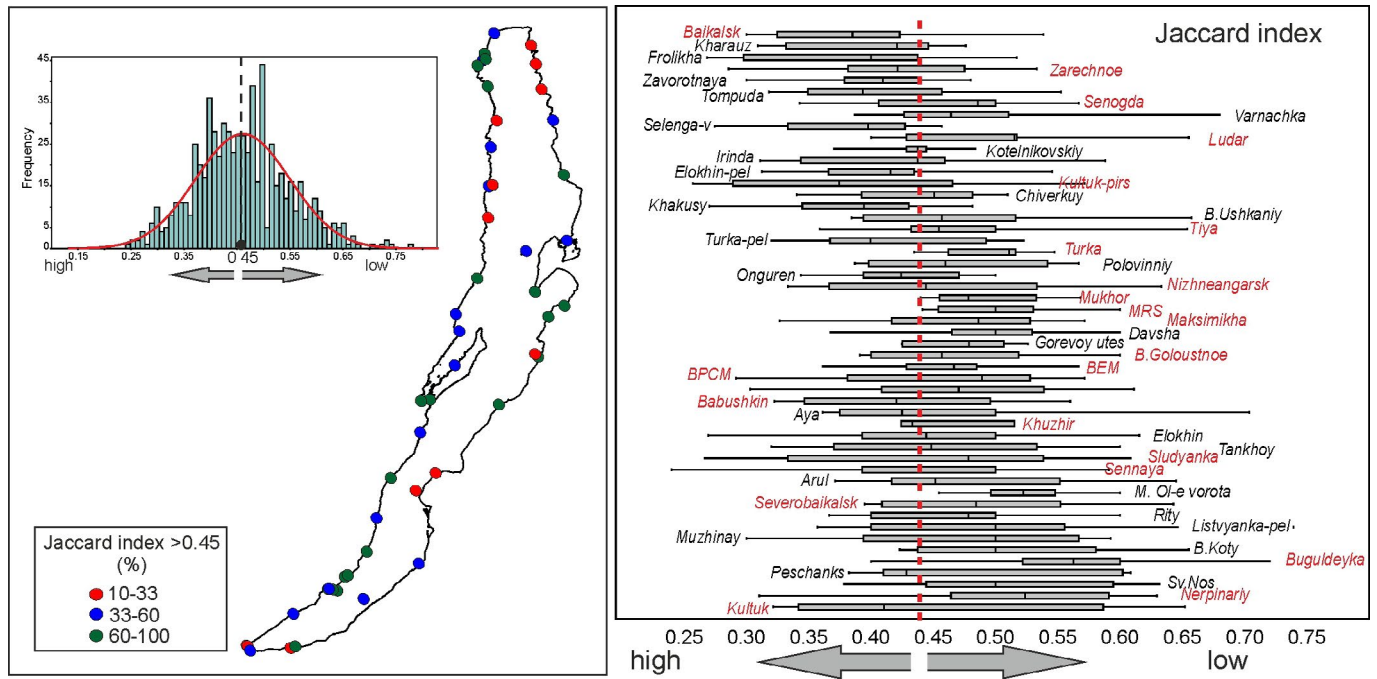


Fig.15. Distribution of species diversity in groups and at individual stations. 1 - number of species, 2 - Shannon index, 3 - Simpson index, 4 - species with a share exceeding 2% in their Order.



**Fig.16.** Distribution of the Jaccard index in autumn phytoplankton.

Additionally, the “rooted cluster” method was used. The stations of the first and second groups were selected as the starting points for constructing clusters (Fig. 17). For example, the Zarechnoye station is one of the places on Lake Baikal with clear manifestations of eutrophication in the form of abnormal phyto-benthos blooms and massive emissions of organic detritus into the beach zone (Timoshkin et al., 2018). The species composition of phytoplankton at this station is very similar to that at both the stations of the first group and the stations of the second group (Ritiiy, Sv. Nos, Ulanovo). Station Slyudyanka, adjacent to the city of the same name (population 18 thousand people), the species composition of phytoplankton is expectedly close to that at the Kultuk station and background stations of Northern Baikal and even at the pelagic station (Elokhin-pel.).

Figure 17D shows correlation ( $r > 0.5$ ) of the species composition of phytoplankton at st. Sludyanka station with other stations. For instance, in the spring the number of stations with a high correlation with st. Sludyanka was 47, in the autumn - 51. The largest number of stations with a similar species composition, as at st. Sludyanka, was in 2020 and 2021 - 47 and 46 stations, respectively, and the smallest in 2017 and 2022 - 18 and 6 stations, respectively. At the same time, in 2017 and 2022, low correlations were found with nearby stations Kultuk, Baikalsk, BPCM and high correlations with the stations of Nort Baikal - Elokhin, Kotelnikovskiy and the Selenga River delta.

The average long-term relationships between groups of stations for types of small-cell phytoplankton (*Anabaena* sp., *A. flos-aquae*, *A. macrospora*, *A. scheremetievi*, *L. limnetica*, *Oscillatoria* sp. 3, *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *D. sociale*, *R. pusilla*, *Cryptomonas* sp. 1, *Cryptomonas* sp. 2, *C. gracilis*, *C. marssonii*, *C. ovata*, *C. reflexa*, *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, *Glenodinium* sp. 2, *Stephanodiscus minutulus*, *St. hantzschii*, *Stephanodiscus* sp. 1, *K. longiseta*, *M. arcuatum*,

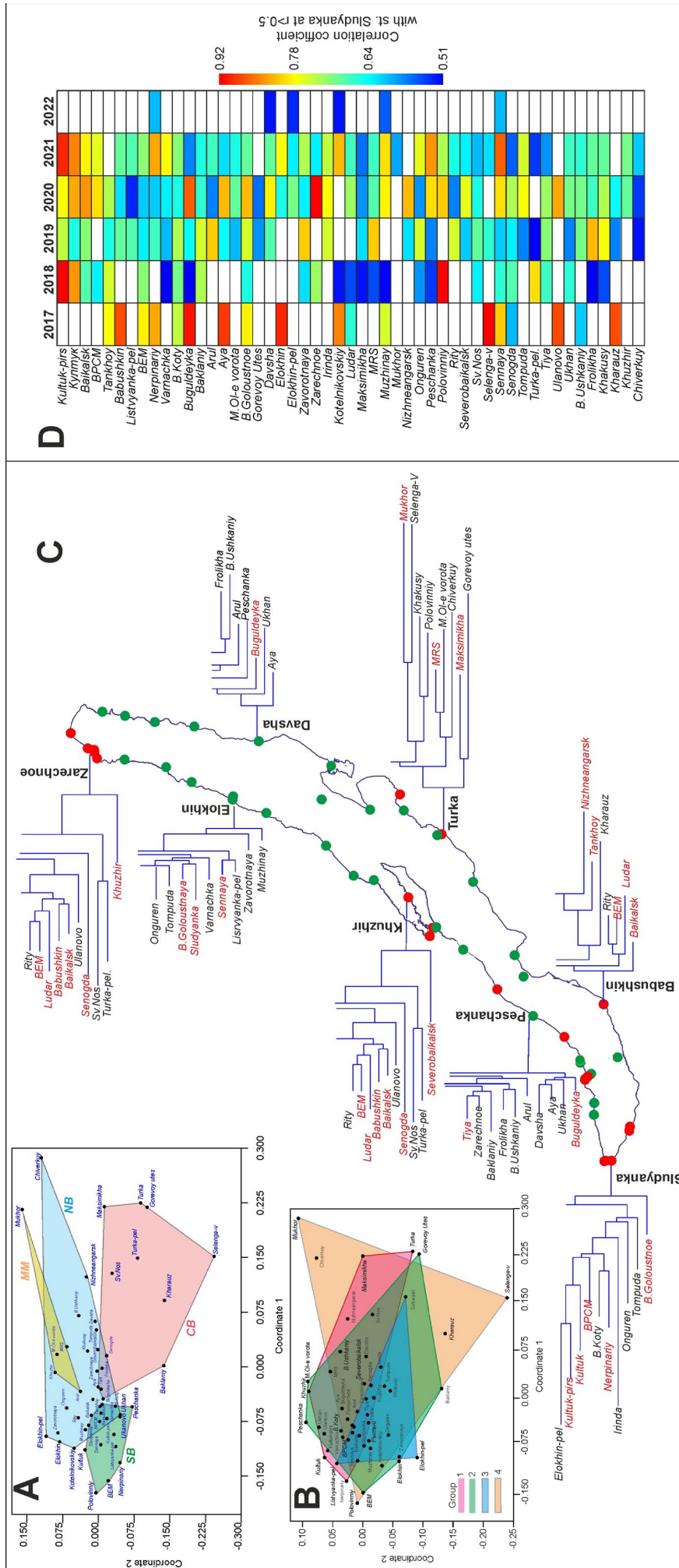
*Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp. 1, *Euglena* sp. 2, *Euglena* sp. 3, *T. hispida*, *Trachelomonas* sp.) were also tested.

The results show that, as in the spring, there is no clear differentiation of small-cell phytoplankton communities at stations belonging to different groups (Fig. 18). The greatest differences in the species composition of small-cell phytoplankton are noted at the stations of Mukhor, Maksimikha, Turka, Turka-pel, Gorevoy utes, Baklaniy, Selenga-v, Kharauz. That is, at stations located near river mouths and in bays.

Compared to spring phytoplankton, the abundance of *Chlamydomonas* sp. was low in autumn. Of 283 observation points, relatively high abundance was at the stations: Baikalsk (2018) - 36, Selenga-v (2017) - 10 and Tyya (2018) - 9 thousand cells/L. At 144 stations (51%), the abundance of *Chlamydomonas* sp. did not exceed 1 thousand cells/L.

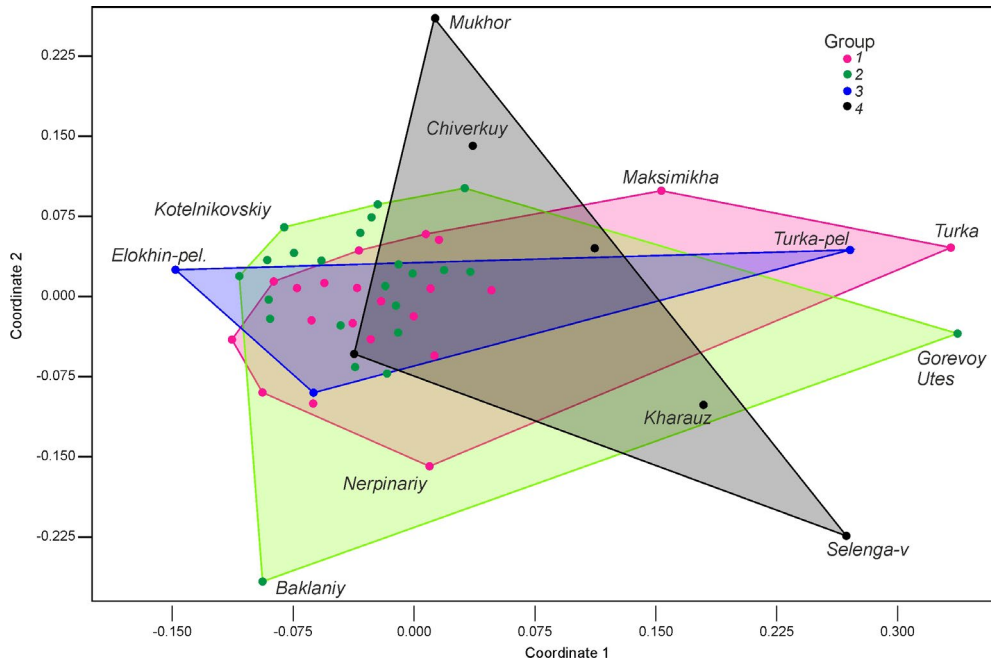
As in the spring phytoplankton, the autumn distribution of *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2 was studied. *Peridinium* sp. (*euriceps*) had the lowest abundance and rare occurrence, the abundance did not exceed 0.4 thousand cells/L. In 2019 and 2020, it was not found at any of the stations. The abundance and occurrence of *Glenodinium* sp. 2 were also extremely low. This species was not found in 2017 and 2018 (Fig. 19). At most stations, its abundance did not exceed 1 thousand cells/L. *Glenodinium* sp. 2 was most abundant in 2019, with an average abundance of 2 thousand cells/l and a maximum abundance of 11 thousand cells/L at st. M. Ol-e vorota.

*Glenodinium* sp. 1 was found at almost all stations (Fig. 19). The maximum abundance of 102 thousand cells/L was recorded at st. Nizhneangarsk in 2021. If we compare the autumn and spring distribution of *Glenodinium* sp. 1, we can see that the average values of its abundance are similar (2.5 - 3.8 thousand cells/L) in both seasons, and the values of standard deviations and maximum abundance values are higher in the spring generation (Fig. 20).



**Fig. 17.** A - Separate of the lake basins (green field - Northern basin, blue field - Central basin, yellow field) by the species composition of phytoplankton based on method nMDS. B - division of stations based on their group affiliation. C - rooted cluster method, large inscriptions - stations from which the cluster construction starts. D - stations that have a correlation with Slyudyanka station at  $r > 0.5$  in the interannual aspect.





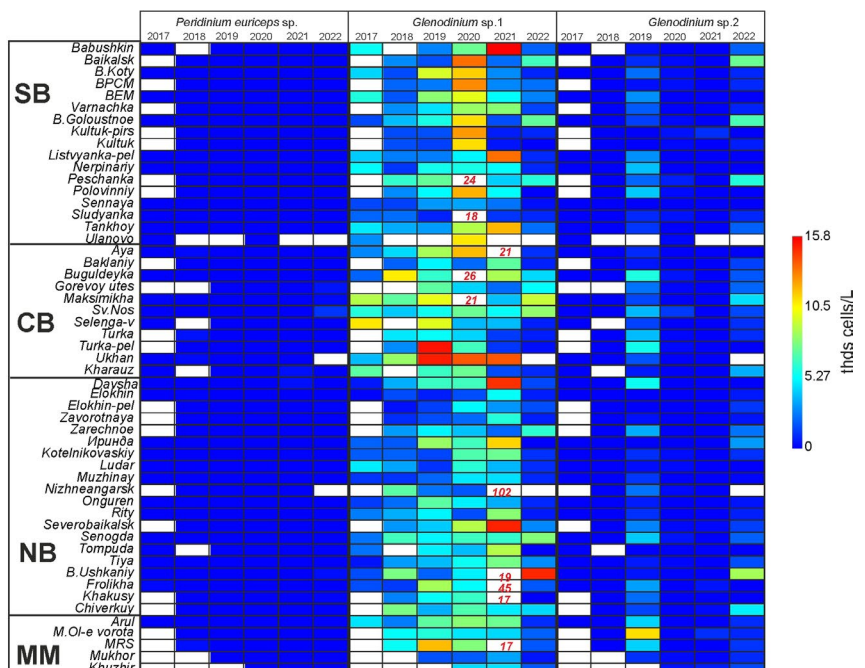
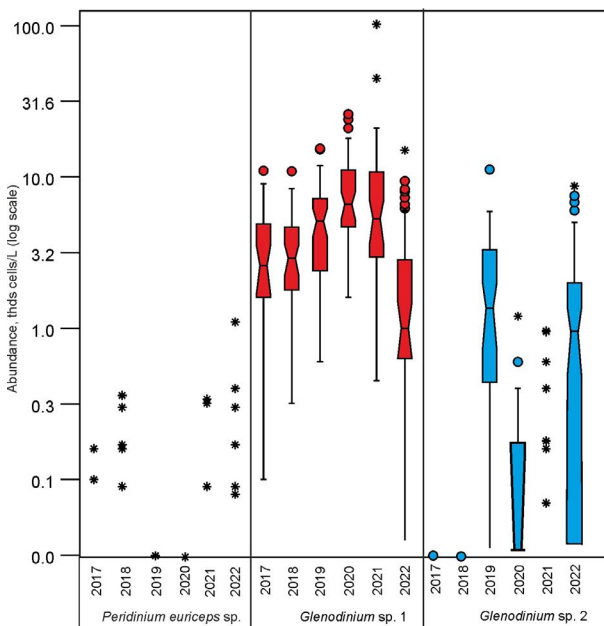
**Fig.18.** Distribution of autumn small-cell phytoplankton based on the group affiliation of stations (nMDS method). 1, 2, 3 and 4 – group of stations.

The grouping of stations by the abundance of *Glenodinium* sp. 1 for 2017-2022 based on the UMAP method does not reveal a predisposition to the formation of clusters characteristic of stations with high and low anthropogenic load. Moreover, stations from different basins of the lake were included in a single cluster (Fig. 20B).

Thus, based on the species composition of autumn phytoplankton communities, it is impossible to reliably divide areas of the water area by the degree of anthropogenic impact on the littoral zone of Lake Baikal.

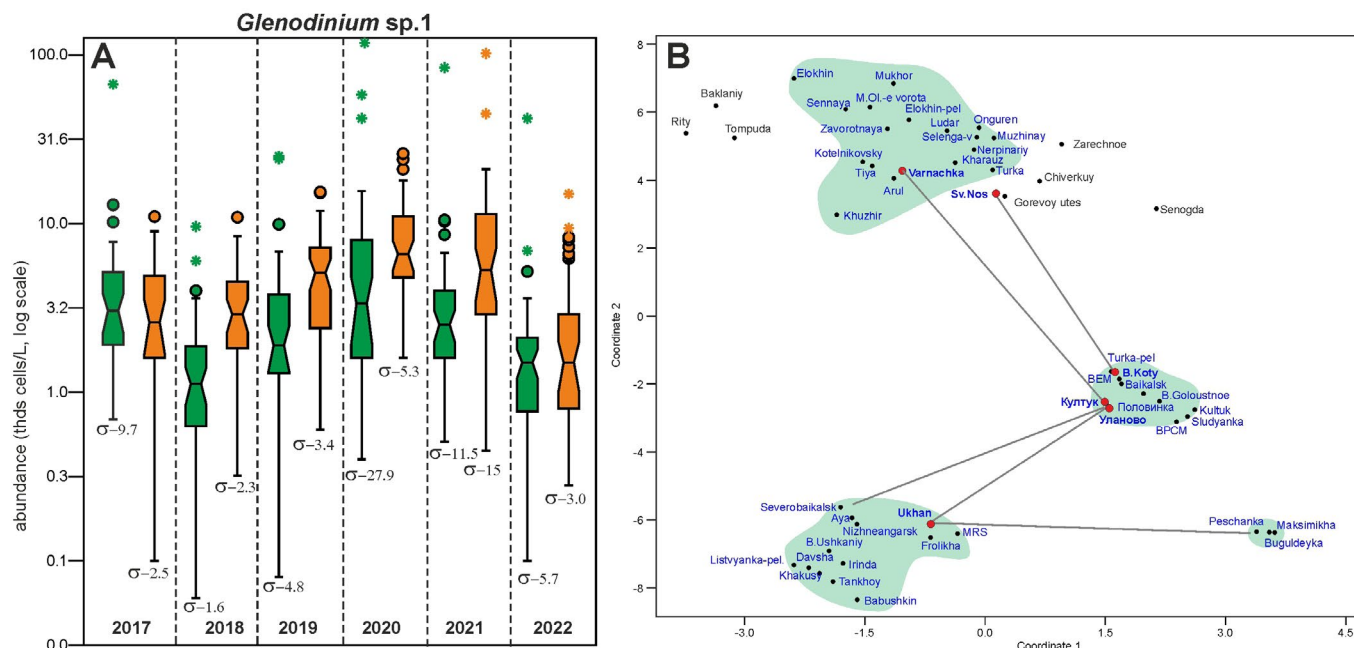
### 3.3. Saprobity

The degree of organic pollution of water was assessed based on the presence of indicator phytoplankton species - 93 species (Table 3) in the seasonal aspect and taking into account the group affiliation of the stations. Beta-mesosaprobionts ( $\beta$ ,  $S = 2$ ) dominate in the set of indicator species (32%). The share of oligo-alphamesosaprobionts ( $\alpha$ ,  $S = 1.8$ ), oligo-beta-mesosaprobionts ( $\beta$ ,  $S = 1.4$ ) and oligosaprobiont ( $\alpha$ ,  $S = 1.0$ ) was 17, 16 and 11%, respectively. All other saprobiological groups were less than 10% (Table 3).



**Fig.19.** Distribution of the abundance of *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2 in autumn phytoplankton. SB – South Baikal, CB – Central Baikal, SB – North Baikal, MM – Maloe More Strait.





**Fig.20.** A - distribution of *Glenodinium sp. 1* abundance in spring (green bars) and autumn (orange bars) phytoplankton. B - grouping of stations by *Glenodinium sp. 1* abundance for 2017-2022 based on the UMAP method (8 neighbors, distance 0.2).

The range of changes in saprobity values was: in spring 1.46-1.69 (mean-1.6), in autumn 1.58-1.68 (mean-1.65) (Fig. 21). In most cases, the saprobity indices correspond to the Limnosaprobity model,  $\beta$ -self-purification zones ( $S = 1.5$ - $2.5$ ), and the 3rd class of water quality (moderately polluted) according to the works of Sládeček (1973) and Barinova (2017).

It is traditionally assumed that the values of this index correspond to the “concentration of organic matter of natural (mainly detrital) nature” and the “concentration of dissolved oxygen”. However, the close ratio of indices for such different groups of stations and seasons raises doubts about the adequacy of its application for Baikal. For example, according to the concept of the saprobity index, its increased values should be expected for stations of group 4, adjacent to the estuary zones of rivers or located in bays. However, the values of the saprobity index for these stations were lower than for stations of groups 1 and 2. According to this index, stations of South Baikal located near settlements, for example, Listvyanka, Slyudyanka, Kultuk, Tankhoy, look better than stations of group 2 with minimal anthropogenic load. Also, on North Baikal, the Zarechnaya station with the most abnormal development organic detritus of *Spirogyra* on Baikal looks better than the Frolikha and Elokhin stations from the group 2.

In the case of spring phytoplankton, the saprobity index increased due to *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *K. longiseta* and *M. arcuatum*, which exhibited  $S$  index - 2. In autumn phytoplankton, the saprobity index increased due to only one species. – *Ch. parva* ( $S = 2.0$ ).

It is evident that only a limited number of species, developing massively in Lake Baikal, give it the status of the 3rd class of water quality (moderately polluted). At the same time, one should ask the question - if these species-markers of “pollution” are present not only in the littoral zone, but also in the pelagic zone,

does this imply that the pelagic zone of the lake is also moderately polluted?

For instance, algae of the genus *Dinobryon* are indicators of oligotrophic conditions, preferring water bodies with a minimum content of mineral phosphorus, typical of deep-water northern lakes (Bondarenko and Logacheva, 2016). *D. cylindricum* is a typical representative of the lake pelagic zone with a total share of 2-18% in the phytoplankton community (Popovskaya et al., 2015). In spring phytoplankton at the stations of group 1, its average abundance is 40 thousand cells/L, and at the stations of group 3- 70 thousand cells/L (Table 2). So, could the stations of group, enriched with “polluted” waters, produce such a quantity of *D. cylindricum* for the pelagic zone of the lake? It is considering that at stations of groups 2 and 4 average content of *D. cylindricum* is 99 and 87 thousand cells/L, respectively, there is no reason to assume that this type is an indicator of moderately polluted waters.

The abundance of *Ch. parva* recorded in 2017-2022 both in the spring and autumn periods was no more than 5 million cells/L and did not exceed the abundance of this species recorded at the B. Koty station in 1980-2000 (Izmes't'eva et al., 2011). Additionally, in 1980-2000 the abundance of this species remained approximately stable. At st. BEM (Listvyanka) in the spring and autumn in 2017-2022 the content of *Ch. parva* did not exceed 58 and 482 thousand cells/L, respectively. However, in 1990-1995 at the same station its content reached 6439 thousand cells/L. (Vorobyeva, 2018). Thus, over the past 40 years *Ch. parva* has been a typical representative of Baikal phytoplankton, although significant changes in the intensity of anthropogenic impact occurred during this period. Thus, we cannot say that the use of the saprobity index provides an adequate assessment of the quality of the waters of Lake Baikal.

### 3.4. The influence of water content of tributaries on phytoplankton

An indicator of low water inflow into the lake is the level of Lake Baikal. Seasonal fluctuations in the lake level are characterized by the fact that the minimum lake level occurs in late April-early May, and the maximum in September-October. In our case, we can see that extremely low lake levels both in spring and autumn were in 2016 and 2017 and in the spring of 2018 (Fig. 1). From the summer of 2018 until the end of 2023, seasonal fluctuations were close to the long-term average (Sinyukovich et al., 2024). However, the autumn level of Baikal in 2021, 457.22 m, was the maximum for 2010-2022. Thus, we have several reference periods for comparison: 2017 and spring 2018 – extremely low water content of tributaries, 2021 – extremely high water content, 2019, 2020 and 2022 – normal average long-term water content.

After the ice cover breaks up, the width of the mixing zone of lake and river waters is affected by wind mixing and the boundary of the thermal bar, which has a blocking effect on the penetration of river waters into the lake (Tomberg et al., 2019; Tomberg et al., 2024). In the distribution of spring phytoplankton, clusters of stations from 2017, 2020, 2021 and 2022 are clearly distinguished, and a cluster so-called “union”, consisting of stations from all years of observation, that is, stations that are weakly separated from each other in the interannual aspect (Fig. 22). The low-water cluster of 2017 includes the following stations: Aya, Nizhneangarsk, Arul, Baklaniy, Buguldeyka, Davsha, Elokh-pel, Elokhin, Zarechnoye, Irinda, Kotelnikovskiy, Ludar, Maksimikha, MRS, Muzhinay, Olkhonskiyevorota, Muzhinay, Ongureny, Ryty, Severobaykalsk, Selenga-vykhod, Senogda, Tompuda, Turka, Turka-pel., Tyya, B. Ushkany, Khakusy, Khuzhir and Chivyrkuy. This cluster is characterized by low biomasses - an average of 600 mg/m<sup>3</sup> and an average species abundance of 18 species (Fig. 22). It looks curiously that the stations directly adjacent to large tributaries of Lake Baikal (rivers Upper Angara, Turka, Rel, Tompuda, Tyya, Buguldeika, etc.) did not show high values of phytoplankton biomass. While the 2017 stations included in the “union” cluster (Sennaya, Zavorotnaya, BEM, B. Goloustnoye, Nerpinariy, B. Koty, Mukhor, Kultuk, Slyudyanka, Kultuk\_pirs, Kharauz, Tankhoy, Babushkin, BPCM, Baikalsk) have a poor species composition - an average of 12 species, but high biomass up to 1500 mg/m<sup>3</sup>.

The main differences between the 2017 cluster and the “single” cluster are the abundance of *D. cylindricum*, *Ch. parva*, *R. pusilla*, *N. graciliformis*, *K. longiseta* and *S. acus* subsp. *radians*. In addition, *S. acus* subsp. *radians* was noted with increased biomass at the 2017 stations of the “single” cluster (Fig. 22). Thus, in 2017, 32 stations had species features characteristic of this period, and 15 stations were no different from stations of other periods.

During the period of extreme water content in 2021, 42 stations formed in a separate cluster, and 9 stations were assigned to the “union” cluster (BEM,

Kultuk, Listvyanka\_pelagial, Nizhneangarsk, Polovinniy, Selenga-v, Sennaya, Slyudyanka, Ulanovo). On average, 22 species were recorded at the stations of the 2021 cluster, and the biomass reached 1700 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 22). At the 2021 stations assigned to the “single” cluster, the biomass was lower than at the stations of the same cluster in 2017. The stations of the 2021 cluster differ from the 2021 stations assigned to the “union” cluster in that they do not have indicator species, despite the higher taxonomic diversity. The main differences (53%) are determined by the increased presence in the 2021 cluster – *M. arcuatum*, *A. islandica*, *St. meyeri*, *D. cylindricum*, *Ch. parva*, *S. acus* subsp. *radians*.

The stations of 2018 and 2019 had no clear features and all entered the “union” cluster. Eight stations of South Baikal (Babushkin, Tankhoy, Baikalsk, BPCM, Slyudyanka, Kultuk, Kultuk\_pirs, Polovinniy) also formed a separate cluster of 2020. And this cluster is due to the increased abundance of *A. baicalensis*, *A. islandica*, *S. acus* subsp. *radians*. All other stations of 2020 belonged to the “union” cluster. The stations of 2022 also formed a separate cluster, with close connections between individual stations of North Baikal and the Maloe More (Gorevoy Utes, Svyatoy Nos, Aya, Davsha, Zarechnoye, Ludar, MRS, M.Ol.-e-vorota, Severobaykalsk, Senogda, Tiya, Frolikha, Khakusy).

The cluster pattern described above does not allow us to reliably assume that spring phytoplankton has an unambiguous response to the water regime. If the onset of phytoplankton development occurs during the ice-covered period, so many tributaries of the lake are in a frozen state with minimal underflow in large rivers (Selenga, Upper Angara, Barguzin, Turka, Tyya) or its complete absence in small tributaries. Most often, the fluctuations of the minimal lake level from year to year is around 20 cm, and this also cannot be a key factor determining the development of spring phytoplankton. The results for 2018 are indicative, thus the spring of 2018 was preceded by low-water years of 2014-2017, and it would seem that the lake should experience a lack of biogenic component to 2018. However, the stations of 2018 are completely in a “union” cluster, and not indicating any changes in phytoplankton communities caused by the previous low-water period. Conversely, 2020 and 2022 stations form separate clusters, although there were no prerequisites in the form of previous significant fluctuations in water content.

For autumn phytoplankton, only the cluster of 2022 is clearly separated from the others, while clusters of 2017 and 2021 are close to a “union” cluster №1 (Fig. 22). At the same time, there are two “onion” clusters that combine stations from different years. The stations of a separate cluster of 2017 (20 stations) differ from other stations of 2017 (Selenga-v, Kharauz, Tankhoy, Tiya, Frolikha, Tompuda, Irinda, Sv. Nos, Nerpinariy, Babushkin, Maksimikha) by an increased presence of *R. pusilla*, *Ch. parva*, *C. minuta*, *Oscillatoria* sp.

The stations of the 2021 cluster (37 stations) differ from other stations of 2021 (Tankhoy, Mukhor, Gorevoy Utes, Baklaniy, Sv. Nos, Kharauz, Turka-pel, Turka, Maksimikha, Davsha, Tompuda, Khakusy,

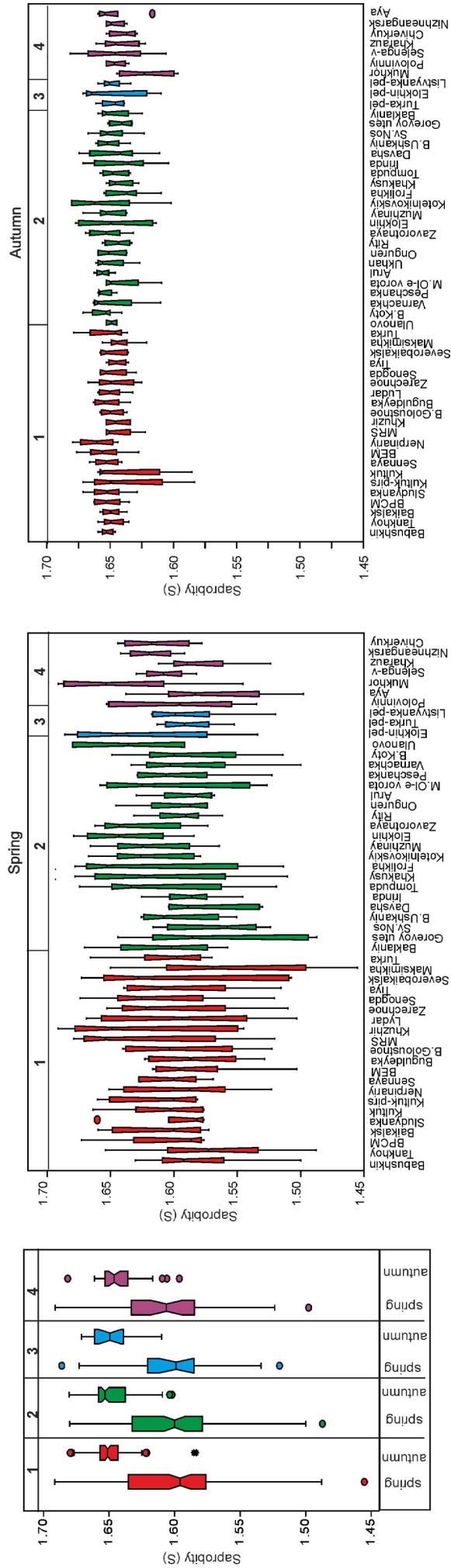


Fig.21. Distribution of the saprobity index of spring and autumn phytoplankton.

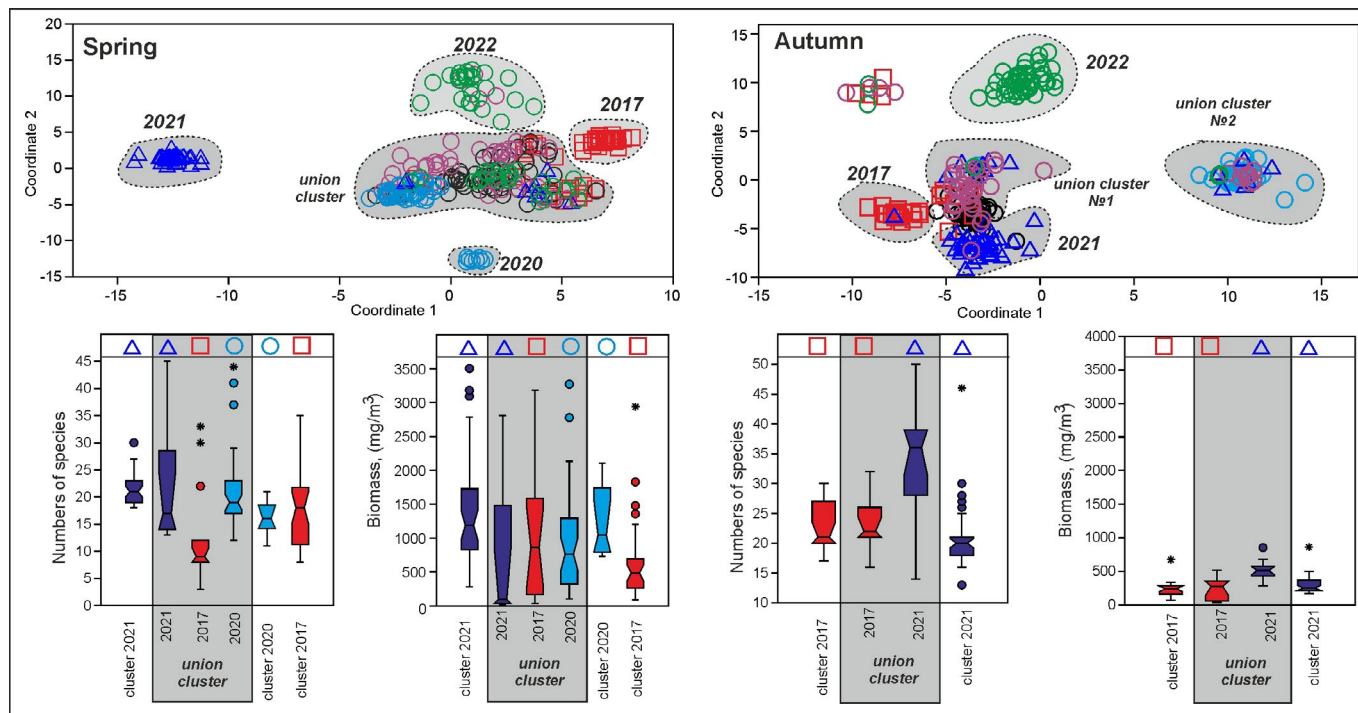
**Table 4.** Species-indicators of saprobity

Indicator species	S saprobity index of indicator species	Saprobiological group	
<i>Aulacoseira baicalensis</i>	0.4	χ-ο	
<i>Chryso-sphaerella baicalensis</i>	0.4		
<i>Cyclotella baicalensis</i>	0.4		
<i>Cyclotella minuta</i>	0.4		
<i>Gymnodinium baicalense</i>	0.4		
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.4		
<i>Peridinium baicalense</i>	0.4		
<i>Aulacoseira islandica</i>	0.6	ο-χ	
<i>Tabellaria flocculosa</i>	0.6		
<i>Asterionella formosa</i>	1	ο	
<i>Ceratium hirundinella</i>	1		
<i>Cryptomonas gracilis</i>	1		
<i>Cyclotella ocellata</i>	1		
<i>Dinobryon bavaricum</i>	1		
<i>Gloeocapsa turgida</i>	1		
<i>Gyrodinium helveticum</i>	1		
<i>Synedra acus</i> subsp. <i>radians</i>	1		
<i>Synedra ulna</i> var. <i>danica</i>	1		
<i>Urosolenia longiseta</i>	1		
<i>Anabaena scheremetievi</i>	1.4		ο-β
<i>Anabaena spiroides</i>	1.4		
<i>Cyclostephanos dubius</i>	1.4		
<i>Diatoma elongatum</i>	1.4		
<i>Dinobryon cylindricum</i>	1.4		
<i>Fragilaria capucina</i>	1.4		
<i>Fragilaria crotonensis</i>	1.4		
<i>Lyngbya limnetica</i>	1.4		
<i>Merismopedia major</i>	1.4		
<i>Microcystis pulvereae</i>	1.4		
<i>Nitzschia graciliformis</i>	1.4		
<i>Pediastrum kawraiskyi</i>	1.4		
<i>Rhodomonas pusilla</i>	1.4		
<i>Stephanodiscus makarovae</i>	1.4		
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	1.4		
<i>Crucigenia quadrata</i>	1.6	β-ο	
<i>Cryptomonas reflexa</i>	1.6		
<i>Gloeotrichia pisum</i>	1.6		
<i>Oocystis lacustris</i>	1.6		
<i>Schroederia setigera</i>	1.6		
<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	1.6		
<i>Acanthoceras zachariadi</i>	1.8	ο-α	
<i>Closterium ehrenbergii</i>	1.8		
<i>Crucigenia tetrapedia</i>	1.8		
<i>Cryptomonas ovata</i>	1.8		
<i>Cryptomonas rostrata</i>	1.8		
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	1.8		
<i>Dinobryon divergens</i>	1.8		
<i>Elakatothrix genevensis</i>	1.8		
<i>Ellerbeckia teres</i>	1.8		
<i>Mallomonas vannigera</i>	1.8		
<i>Merismopedia glauca</i>	1.8		
<i>Pediastrum boryanum</i>	1.8		
<i>Pediastrum duplex</i>	1.8		
<i>Pediastrum tetras</i>	1.8		

Indicator species	S saprobity index of indicator species	Saprobiological group
<i>Scenedesmus arcuatus</i>	1.8	ο-α
<i>Scenedesmus bijugatus</i>	1.8	
<i>Actinastrum hantzschii</i>	2	β
<i>Anabaena flos-aquae</i>	2	
<i>Anabaena lemmermannii</i>	2	
<i>Anabaena macrospora</i>	2	
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	2	
<i>Chrysochromulina parva</i>	2	
<i>Closterium moniliferum</i>	2	
<i>Coelastrum microporum</i>	2	
<i>Cosmarium botrytis</i>	2	
<i>Cryptomonas erosa</i>	2	
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	2	
<i>Dinobryon sociale</i>	2	
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	2	
<i>Koliella longiseta</i>	2	
<i>Lagerheimia genevensis</i>	2	
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	2	
<i>Monoraphidium contortum</i>	2	
<i>Phacus caudatus</i>	2	
<i>Scenedesmus acuminatu</i>	2	
<i>Sc.acuminatus</i> var. <i>biseriatus</i>	2	
<i>Scenedesmus denticulatus</i>	2	
<i>Scenedesmus obliquus</i>	2	
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	2	
<i>Synedra acus</i>	2	
<i>Synedra ulna</i>	2	
<i>Synura petersenii</i>	2	
<i>Tetraëdron incus</i>	2	
<i>Trachelomonas</i> sp. ( <i>volvocina</i> )	2	
<i>Trachelomonas hispida</i>	2	
<i>Volvox aureus</i>	2	
<i>Aulacoseira granulata</i>	2.4	β-α
<i>Closterium littorale</i>	2.4	
<i>Cryptomonas marssonii</i>	2.4	
<i>Merismopedia tenuissima</i>	2.4	
<i>Chlorella vulgaris</i>	3	α
<i>Melosira varians</i>	3.6	α-β
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	3.6	

Saprobiological group	% Species
χ-ο	8
ο-χ	2
ο	11
ο-β	16
β-ο	6
ο-α	17
β	32
β-α	4
α	1
α-β	2
Σ	100





**Fig.22.** Clustering of spring and autumn phytoplankton based on the year of its formation. Red squares are stations of 2017, black circles are stations of 2018, purple circles are stations of 2019, blue circles are stations of 2020, blue triangles are stations of 2021, green circles are stations of 2022.

Frolikha, Chiverkuy, Irinda) in the numerical values of *M. arcuatum* and *D. sociale*. And at the stations assigned to the “unified” clusters № 1 and №2, a greater contribution to the differences is made by *M. pulvereae*, *M. contortum*, *St. minutulus*, *A. formosa*, *C. gracilis*, *A. lemmermannii*, *A. granulata* and *N. graciliformis*.

It is curiously, however, the 2021 cluster is poorer in species composition than the 2017 clusters. The biomass values of 2017 and 2021 are almost comparable with each other, and are lower than the biomass values at the stations of the spring cluster of 2017 (Fig. 22). Thus, in the autumn phytoplankton, we do not find clear evidence of the relationship between the water content of the tributaries and the development of phytoplankton. Also, we do not observe an unambiguous linear relationship in the system “that an increase in the influx of biogenic components, as a result of river runoff, is directly proportional to an increase in the biomass of phytoplankton.” For example, a study of the distribution of phytoplankton in the Angara-Kichera shallow waters of North Baikal showed that, despite high concentrations of silica, nitrogen and phosphorus at a distance of up to 8 km from the mouth of Upper Angara River, phytoplankton developed only in the 1-1.5 km zone from the mouth (Tomberg et al., 2024). That is, the expansion of phytoplankton into the lake was limited by some other factors, and not by the amount of biogenic components.

Table 5 shows that 2017 and 2021 are also not clearly distinguished by phytoplankton biomass at stations located close to river mouths. At the same time, the stations of the Selenga River shallow waters show diametrically different distribution of biomass. At most stations, unremarkable in hydrological terms, an increase in phytoplankton biomass and species composition was noted in 2020 (Fig. 22).

Most likely, the supply of phytoplankton with biogenic elements is more influenced by the internal hydrophysical processes of Lake Baikal in the form of upwelling - the influx of deep waters into the photic zone. For example, during the experiment at the B. Koty station, when the chemical composition of the water was determined every day from June to November 2020, it was determined that from June 3 to July 17, the content of mineral phosphorus decreased from 9  $\mu\text{g/L}$  to zero values, and on July 18, as a result of a storm, upwelling occurred and the phosphorus concentration again became about 9  $\mu\text{g/L}$  (Domysheva et al., 2023). In general, during the open water period of 2017-2022, such upwelling events in the shallow zone of South and Central Baikal occurred every 4-6 days, and in Northern Baikal 8-16 days (Fedotov and Khanaev, 2023)

### 3.5. Comparison of the obtained data with previous studies

For comparison, the data from 1990-1995 for the Listvyanka –st. BEM was taken. During this period, phytoplankton samples were collected every 5-7 days. Data were selected for several days, approximately coinciding with the dates of the 2017-2022 expeditions. If it compares the total biomass of phytoplankton, it is clearly seen that in our studies the biomass of spring phytoplankton did not exceed 450  $\text{mg/m}^3$ , while in 1990 and 1995 it reached 600 and 1050  $\text{mg/m}^3$ , respectively (Fig. 23). Biomass most of Orders of spring phytoplankton in 1990-1995 were either at the level of or exceeded those in 2017-2022. This is especially noticeable for Cyanophyta and Cryptophyta algae (Fig. 23). Very high variability is also characteristic of the decadal time resolution. For example, if the expedition

Table 5. Biomass of autumn phytoplankton at stations closely adjacent to the mouth zones of Baikal tributaries

year	Biomass, (mg/m <sup>3</sup> )										
	Selenga-v (Selenga River)	Kharauz (Selenga River)	N. Angarsk (U. Angara River)	Turka (Turka River)	Tompuda (Tompuda River)	Irinda (Irinda River)	Buguldeika (Buguldeika River)	B. Goloustnoye (Goloustnaya River)	Kotelnikovskiy (Korkula River)	Tiya (Tiya River)	Polovinniy (Polovinnaya River)
2017	321	281			65	38	309	241	249	42	
2018			283	491		47	279	203	84	182	97
2019	403	436	348	915	343	362	166	170	31	318	545
2020	4633	397	241	444	229	331	400	301	279	153	258
2021	419	510	860	676	281	344	331	208	210	500	232
2022	2491	140		59	95	145	121	158	38	185	1248

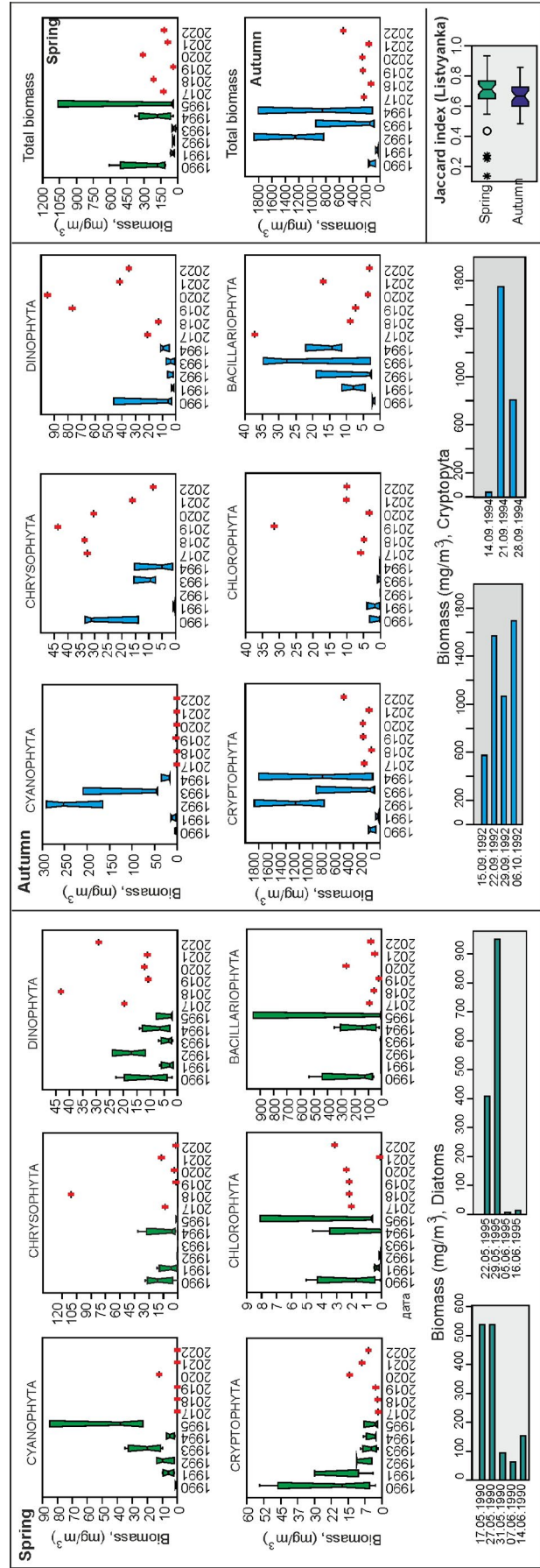


Fig.23. Comparison of phytoplankton biomass distributions for 1990-1995 and 2017-2022. The lower bar graphs show the decadal variability of the biomass of dominant spring (Diatoms) and autumn (Cryptophyta) phytoplankton.

had collected samples at 1995 May 29, so they would have recorded a diatom biomass of - 950 mg/m<sup>3</sup>, but if on 1995 June 5, their biomass would have been only 7 mg/m<sup>3</sup> (Fig. 23). The cause of this phenomenon most likely happened due to a renewal of the upper layer by deep waters during upwelling.

The autumn phytoplankton biomasses of 1992-1994 were 3 and 4 times higher than those of 2017-2022 (Fig. 23). The cryptophyte biomass is especially surprising, reaching 1752 mg/m<sup>3</sup>. Such high total biomasses were generally rare in our studies, not to mention Cryptophyta, the biomass of which did not exceed 450 mg/m<sup>3</sup> at the fourth group of stations (Fig. 13). The reason for the sharp increase in biomass, when on 1994 September 14 the Cryptophyta biomass was 42 mg/m<sup>3</sup>, and on 1994 September 21 it increased up to 1752 mg/m<sup>3</sup>, also remains completely unclear. It can be assumed that the biomass accumulation occurred due to cell division and their increase according to the exponential equation. However, during this period of time, the biomass of other classes decreased. On the other hand, what was the source of nutrients for the growth of Cryptophyta in the 1990s in Listvyanka? In terms of the intensity of economic and household activities in those years, the village was clearly inferior to the modern period

When studying the process of sedimentation of planktonic algae in the littoral zone near the settlement of B. Koty in July 2002, it was found that the integral values of phytoplankton in the 0-15 m layer increased from 1.7 billion/cells m<sup>-2</sup> on July 15, 2002 to 5.2 billion/cells m<sup>-2</sup> by July 22, 2002, i.e. more than 3 times (Krashchuk and Izmistieva, 2004).

There are 4 stations (BEM, Sennaya, Nerpinariy, Listvyanka-pel) in the area of the settlement of Listvyanka. The similarity of the species composition (Jaccard index) at these stations was checked for each year. On average, these stations had a similarity index for the spring and autumn survey of 0.7 and 0.62, respectively. However, there were also index values of about 0.5, and the spring species composition of 2017 had a similarity index between stations of 0.13-0.4, that is, with no similarity (Fig. 23). Thus, we can conclude that interannual comparison of quantitative parameters of phytoplankton at one station can give a largely false, uninterpretable result.

#### 4. Conclusions

The study presents data on the dynamics of changes in the species composition, cell abundance and biomass of littoral phytoplankton in the spring (late May-early June) and autumn (late September) periods of 2017-2022. The research stations were located along the perimeter of Lake Baikal every 30-50 km. The observation stations were divided into 4 groups: 1 - stations adjacent to settlements, 2 - without such influence, 3 - pelagic stations and 4 - stations of the estuaries of rivers and bays.

In the spring phytoplankton, diatoms were absolute dominants (67.5%). The rate of Haptophyta ones was (15%). The average biomass of diatoms in groups

1, 2, 3 and 4 was 756, 561, 713 and 904 mg/m<sup>3</sup>, respectively. Most often, 15-22 species were found at the stations. The highest values of species richness - 40-45 species were at the stations located near the Selenga River delta.

In autumn phytoplankton, the minimum and maximum number of species found at one station were 11 and 50, respectively. In terms of numbers, autumn phytoplankton of Lake Baikal can be characterized as a community of Haptophyta-Cryptophyta algae, and in terms of biomass, only as a community of Cryptophyta algae. The number and biomass of Cryptophyta algae could reach 2235 thousand cells/L and 472 mg/m<sup>3</sup>, respectively. Haptophyta with a high number, reaching 1000 thousand cells/L, had a small biomass, often below 50 mg/m<sup>3</sup>. It was found that the saprobity index for all groups was most often 1.46-1.69 (means 1.6) in spring and 1.58-1.68 (means 1.65) in autumn. However, only a few species, developing massively in Baikal, gave it the status of the 3rd class of water quality (moderately polluted), which casts doubt on the relevance of using this index for Lake Baikal. Also, no clear evidence of the relationship between the water content of tributaries and the development of littoral phytoplankton was found.

Based on the species composition, cell numbers and biomass of spring and autumn phytoplankton, we were unable to reliably illuminate parts of the littoral zone by the degree of anthropogenic impact.

#### Acknowledgements

We express our gratitude to Anoshko P.N., Kuzmin A.V., Nosova V.V., Zhuchenko N.A., Golobokova L.P., Mayor T.Yu., Usov S.V., the team of the R/V "Papanin" for their assistance in carrying out fieldwork. Bondarenko N.A., Mayor T.Yu., Zheleznyakova T.O. for their comments, wishes and assistance in preparing the paper. The work was done within the framework of the state assignments #121032300224-8.

#### Conflict of interest

The authors declare no competing financial or personal interests.

#### References

- Algae: reference book. 1989. In: Vasser S.P., Kondratieva N.V., Masyuk N.P. (Eds.). Kyiv: Nauka. (in Russian)
- Antipova N.L., Kozhov M.M. 1953. Materials on seasonal and annual fluctuations in the abundance of key phytoplankton forms in Lake Baikal. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Biologiya. Ekologiya* [Proceedings of Irkutsk University. Biology. Ecology Series] 7(1-2): 63-68. (in Russian)
- Antipova N.L. 1963. Seasonal and annual changes in phytoplankton in Lake Baikal. *Trudy Limnologicheskogo instituta Sibirskoe otdelenie Akademiya nauk SSSR* [Proceedings of the Limnological Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences] 2 (22): 12-28. (in Russian)
- Barinova S. 2017. On the classification of water quality from an ecological point of view. *International Journal of*

Environmental Sciences & Natural Resources 2: 1-8.

Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel Aviv: PiliesStudio. (in Russian)

Belykh O.I., Bessudova A.Yu., Gladkikh A.S. et al. 2011. Guide to determining the biomass of plankton species in the pelagic zone of Lake Baikal. Methodological manual. Irkutsk: State University Publishing House.

Bondarenko N.A., Logacheva N.F. 2016. Structural changes in phytoplankton of the coastal zone of Lake Baikal. *Gidrobiologicheskij zhurnal* [Hydrobiological Journal] 6: 17-26. (in Russian)

Bondarenko N.A., Ozersky T., Obolkina L.A. et al. 2019. Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia. *Limnologica* 75: 19-29. DOI: [10.1016/j.limno.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.01.002)

Bondarenko N.A., Rusanov I.I., Chernitsyna S.M. et al. 2020. Functioning of microalgae of subglacial plankton and ice interstitial in the coastal zone of Lake Baikal. *Mikrobiologiya* [Microbiology] 89(3): 344-355. (in Russian)

Bondarenko N.A., Vorobyova S.S., Zhuchenko N.A. et al. 2020. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 17-28. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.001)

Bondarenko N.A., Rusanov I.I., Chernitsyna S.M. et al. 2022. Structure and production potential of summer phytoplankton of Lake Baikal in the modern period. *Vodnye resursy* [Water resources] 49(1): 66-76. DOI: [10.31857/S0321059622010059](https://doi.org/10.31857/S0321059622010059) (in Russian)

Britton G. 1986. *Biochemistry of natural pigments*. Moscow: Mir. (In Russian)

Domysheva V., Vorobyeva S., Golobokova L. et al. 2023. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone. *Water* 15(6): 1-14. DOI: [10.3390/w15061139](https://doi.org/10.3390/w15061139)

Fedotov A.P., Khanaev I.V. 2023. Annual temperature regime of the shallow zone of Lake Baikal inferred from high-resolution data from temperature loggers. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 119-125. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-4-119](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-4-119)

Genkal S.I., Popovskaya G.I., Bondarenko N.A. 2006. New data on the morphology, ecology and distribution of *STEPHANODISCUS MEYERI* (BACILARIOPHYTA). *Botanicheskij zhurnal* [Botanical Journal] 91(9): 1329-1334. (in Russian)

GOST 17.1.4.02-90. 1991. Water. Spectrophotometric determination of chlorophyll a. (in Russian)

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4(1): 9.

Kalyuzhnaya L.I., Antipova N.L. 1974. On the role of syndra in the phytoplankton of Lake Baikal. Productivity of Baikal and anthropogenic changes in its nature. Irkutsk, pp. 85 – 94. (in Russian)

Kozhova O.M., Melnik N.G. 1978. Instructions for processing plankton samples by the counting method. Irkutsk: Publishing house of Irkutsk. University.

Krashchuk L.S., Izmistieva L.R. 2004. Sedimentation of phytoplankton in Southern Baikal in summer. In: Ecosystems and natural resources of mountain countries. Novosibirsk, pp. 87-93. (in Russian)

Izmest'eva L.R., Silov E.A., Litchman E. 2011. Long-term dynamics of lake pelagic phytoplankton under climate change. *Inland Water Biology* 4(3): 301-307.

Pomazkina G.V., Belykh O.I., Domysheva V.M. et al. 2010. Structure and dynamics of phytoplankton in Southern Baikal (Russia). *Algologiya* [Algology] 20(1): 56-72. (in Russian)

Popovskaya G.I., Genkal S.I., Likhoshvay E.V. 2011. Diatoms of Lake Baikal plankton: Atlas - identification guide.

Novosibirsk: Nauka. (in Russian)

Popovskaya G.I., Usoltseva M.V., Domysheva V.M. et al. 2015. Spring phytoplankton of Lake Baikal according to the data of the Circum-Baikal expeditions of 2007-2011. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources] 3: 74-84. (in Russian)

Popovskaya G.I. 1977. Dynamics of pelagic phytoplankton. In: Biological productivity of Baikal pelagic zone and its variability. Novosibirsk, pp. 5-39. (in Russian)

Popovskaya G.I. 2000. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 3: 215-225.

Popovskaya G.I. 1991. Phytoplankton of Baikal and its long-term changes (1958-1990). Novosibirsk: USSR Academy of Sciences. Siberian Branch. Center. Siberian Bot. Garden. (in Russian)

Popovskaya G.I. 1987. Phytoplankton of the deepest lake in the world. In: Marine and freshwater plankton. Leningrad, pp. 107-115. (in Russian)

Popovskaya G.I. 1963. Phytoplankton of the Selenga shallow waters, adjacent areas of open Baikal, sors and delta channels of the Selenga River - Listvenichnoye on Baikal. (in Russian)

Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y. et al. 2024. The Variation in the Water Level of Lake Baikal and Its Relationship with the Inflow and Outflow. *Water* 16(560): 1-21. DOI: [10.3390/w16040560](https://doi.org/10.3390/w16040560)

Sládeček V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie* 7: 1-218.

Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sinyukovich V.N. et al. 2019. Low water level in the Selenga River and reduction of silica input to Lake Baikal. *Inland Waters* 9(4): 464-470. DOI: [10.1080/20442041.2019.1580078](https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1580078)

Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N. et al. 2018. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *Journal of Great Lakes Research* 44(2): 230-244. DOI: [10.1016/j.jglr.2018.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008)

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research* 42: 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)

Tomberg I.V., Sinyukovich V.N., Ivanov V.G. et al. 2019. Transformation of the chemical composition of waters from the Barguzin River in the Barguzin Bay (Lake Baikal) *Limnology and Freshwater Biology* 4: 275-280. DOI: [10.31951/2658-3518-2019-A-4-275](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-4-275)

Tomberg I.V., Sorokovikova L.M., Sinyukovich V.N. et al. 2024. Formation of the chemical composition of the waters of Northern Baikal in the mixing zone with the waters of the tributaries. *Meteorologiya i gidrologiya* [Russian Meteorology and Hydrology] 3: 1-13. DOI: [10.52002/0130-2906-2024-3-98-110](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-3-98-110) (in Russian)

Usoltseva M.V., Titova L.A., Firsova A.D. et al. 2023. Long-term dynamics of dominant diatom species abundance of spring phytoplankton in three basins of the pelagic zone of Lake Baikal in 1964-1984 and 2007-2016. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 55-62. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-2-55](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-2-55)

Vorobyeva S.S. 2018. Phytoplankton assemblages of the Southern Baikal in 1990-1995 and 2016-2018. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 141-143. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-2-141](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-2-141)

Votintsev K.K., Meshcheryakova A.I., Popovskaya G.I. 1975. Organic matter cycle in Lake Baikal. Novosibirsk: Nauka. (in Russian)

Yasnitsky V.N., Skabichevsky A.P. 1957. Phytoplankton of Baikal. *Trudy Bajkal'skoj limnologicheskoy stancii* [Proceedings of the Baikal Limnological Station] 15: 212-262. (In Russian)



# Фитопланктон мелководной зоны озера Байкал

Оригинальная статья

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Федотов А.П.\*<sup>ORCID</sup>, Домышева В.М.<sup>ORCID</sup>, Сакирко М.В.<sup>ORCID</sup>, Воробьева С.С.<sup>ORCID</sup>

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

**АННОТАЦИЯ.** В статье рассматривается видовой состав, численность, биомасса прибрежного фитопланктона озера Байкал в весенний (конец мая-начало июня) и осенний (поздний сентябрь) периоды 2017-2022 гг. Станции исследования располагались по периметру озера через каждые 30-50 км. Дается характеристика развития фитопланктона в разных районах озера, и оценка степени влияния на фитопланктон природных и антропогенных факторов.

**Ключевые слова:** озеро Байкал, сезонный фитопланктон, антропогенная нагрузка

Для цитирования: Федотов А.П., Домышева В.М., Сакирко М.В., Воробьева С.С. Фитопланктон мелководной зоны озера Байкал // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - С. 113-177. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-113

## 1. Введение

Первые упоминания о фитопланктоне относятся к концу XIX, началу XX века в работах Gutwinski R.O., Дорогостайского В.Г., Мейер К.М., Яснитского В.Н., Яшнова В.А. и др. При этом с расширением приборных и экспедиционных возможностей стремительно нарастала информация о количественных показателях альгофлоры Байкала и о ее географической приуроченности. Например, Яснитский В.Н. и Скабичевский А.П. (1957) отмечают 120 видов и разновидностей фитопланктона (из них в открытом озере живет около 40 видов). Поповская Г.И. (1963) отмечает, что в Селенгинском мелководье и прилегающих к нему сорах и участках открытого Байкала обнаружено 210 видов фитопланктона, а для всего Байкала более 300. В работе Вотинцев и др. (1975) указывается, что в пелагиале обнаружено 92 вида фитопланктона, при этом большая часть из них в открытом Байкале не живет, а присутствует в связи с выносом из рек, соров и заливов. А к 1990 г. в пелагиале уже регистрируется 122 вида (Генкал и др., 2006; Поповская, 1991). При этом возникает вопрос если литораль озера — это около 5% от всей площади озера, то какая численность этого фитопланктона должны быть в литорали чтобы течениями распространится на 95% площади пелагиали?

Хорошо известно, что фитопланктон Байкала имеет три эпизода максимальной продукции – весен-

ний, начинающийся подо льдом, летний, представленный пикопланктонными формами, и осенний, однако, в весенний максимум создается основная масса крупного растительного планктона (Антипова и Кожов, 1953; Антипова, 1963; Поповская, 1977; Popovskaya, 2000). При этом весенний максимум превышает осенний в одни годы в 100 раз и более, а в другие в 2-8 раз (Поповская и др., 2011). Также, отмечается широкая от 90 до 6000 мг/м<sup>3</sup>, межгодовая вариабельность биомасс фитопланктона пелагиали (Вотинцев и др., 1975; Поповская и др., 2015; Usoltseva et al., 2023). Отмечается, что корреляции между отдельными котловинами Байкала по показателям фитопланктона отсутствуют (Поповская, 1991).

Общая биомасса фитопланктона прибрежной зоне Байкала в разные годы периода 1958-1990 гг. от 2 до 18 раз была выше по сравнению с пелагиальной частью озера (Поповская, 1991). В мелководной зоне были более обильны динофитовые рода *Gymnodinium* Stein. Их биомасса масса может достигать 100-300 г/м<sup>3</sup> (Поповская, 1987).

Начиная с 1980-х годов в пелагиали озера отмечаются существенные изменения в водорослевых сообществах, выразившиеся в снижении в весеннем планктоне *Aulacoseira baicalensis* (K. Meyer) Simonsen, возросшей численности *A. islandica* (O. Müller) Simonsen, *Synedra Ehrenberg*, *Stephanodiscus meyeri* Genkal & Popovskaya, мелкоклеточных видов

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [mix@lin.irk.ru](mailto:mix@lin.irk.ru) (А.П. Федотов)

Поступила: 20 ноября 2024; Принята: 17 февраля 2025; Опубликована online: 26 февраля 2025

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





должен быть более чувствительным к антропогенному воздействию. В связи с этим, целью работы являлось описание видового состава фитопланктона мелководной зоны Байкала исходя из лимнических особенностей побережья озера и уровня антропогенной нагрузки. В последующем эти данные могут являться данными для сравнения динамики видового состава и количественных характеристик фитопланктона в различных частях Байкала.

## 2. Методы

Отбор проб воды выполнялся на двух типах станций с помощью батометра Нискина (Таблица 1). На первом типе станций пробы отбирали с глубины 1 м в 100-200 м от береговой линии, где глубина озера составляла в среднем от 5 до 50 м. Второй тип станций относился к пелагической части Байкала, где также пробы отбирались с 1 м глубины. Пробы отбирались с 2017-2022 гг в два сезона конец мая-начало июня (301 станция) и во второй половине сентября (283 станций).

Для выявления особенностей структуры сообществ фитопланктона в зависимости от расположе-

ния точек опробования по степени антропогенного воздействия и лимнических особенностей станции были разделены на четыре группы (Рис. 1). Первая группа – районы, сопряженные с высокой антропогенной нагрузкой. В Первую группу вошли п. Култук, г. Слюдянка, г. Байкальск, БЦБК (Бывший Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат), п. Танхой, г. Бабушкин, п. Турка, п. Максимиха, г. Северобайкальск, устье р. Тья, п. Заречное, бух. Сеногда, с. Байкальское (мыс Лударь), п. Хужир, ст. МРС (п. Сахюрта), п. Бугульдейка, п. Большое Голоустное, в акватории, сопряженной с п. Листвянка отбирались станции Сенная, Нерпинарий и БЭМ.

Вторая группа - районы с низкой или отсутствующей антропогенной нагрузкой. Это станции: Уланово, мыс. Бакланий, мыс. Горевой утес, п-в Святой Нос (м. Нижнее Изголовье), о. Большой Ушканий, п. Давша, бух. Иринда, бух. Томпуда, зал. Хакусы, бух. Фролиха, м. Котельниковский, м. Мужинай, мыс. Елохин, бух. Заворотная, м. Онгурены, м. Рытый, м. Арул, Малые ворота (пролив Малые Ольхонские ворота), бух. Песчаная, бух. Варначка, п. Большие Коты.

Таблица 1. Станции пробоотбора

Е	Н	Станция	Глубина, м	Е	Н	Станция	Глубина, м
105,864	51,724	Бабушкин	12	108,664	54,538	Елохин	9
104,135	51,529	Байкальск	20	108,480	54,282	Заворотный	10
106,069	52,530	Бугульдейка	26	109,663	54,829	Иринда	16
104,190	51,523	БЦБК	13	109,108	55,043	Котельниковский	20
105,419	52,021	Б.Голоустная	20	108,903	54,849	Мужинай	15
109,311	55,588	Заречное	5	108,525	53,495	Св.Нос	30
103,725	51,708	Култук	36	106,911	53,018	Малые Ольхонские ворота	18
109,212	55,357	Лударь	16	107,624	53,620	Онгурен	13
108,735	53,268	Максимиха	5	105,705	52,259	Песчанка	7
106,890	53,021	МРС	4	108,034	53,829	Рытый	44
109,365	55,637	Северобайкальск	18	109,725	55,127	Томпуда	26
109,228	55,567	Сеногда	8	108,666	53,863	Б.Ушканий	20
103,724	51,664	Слюдянка	16	109,866	55,526	Фролиха	23
105,125	51,648	Танхой	19	109,809	55,355	Хакусы	6
108,191	52,953	Турка	22	105,064	51,900	Б.Коты	25
109,345	55,590	Тья	8	104,514	51,795	Уланово	15
107,326	53,205	Хужир	16	108,709	54,534	Елохин-пел	
104,830	51,864	БЭМ	20	108,178	52,985	Турка-пел.	
103,719	51,718	Култук-пирс	6	104,913	51,818	Листвянка-пел	
104,843	51,864	Нерпинарий	16	106,612	52,789	Ая	10
104,875	51,844	Сенная	36	109,572	55,766	Нижнеангарск	8
107,562	53,466	Арул	15	106,797	53,043	Мухор	5
107,539	52,714	Бакланий	12	106,536	52,399	Селен-В	10
105,103	51,902	Варначка	22	106,243	52,331	Харауз В	20
108,515	53,240	Горевой утес	6	109,125	53,790	Чивыркуй	20
109,462	54,340	Давша	17	104,352	51,797	Половинный	25

В третью группу вошли пелагические станции напротив (1-2 км) п. Листвянка, м. Елохин и п. Турка. В четвертую группы вошли районы, граничащие с устьевыми зонами рек, и крупные заливы. Это р. Селенга (ст. Харауз и ст. Селенга-Выход), р. Верхняя Ангара (вблизи п. Нижнеангарск), зал. Мухор (Малое Море), бух. Ая, мыс Половинный (р. Большая Половинная) и Чивыркуйский залив.

Для измерения хлорофилла "а" воду фильтровали через мембранный фильтр 0.45 мкм, затем пигменты водорослей экстрагировали 90% ацетоном. Спектрофотометрическое измерение ацетонового экстракта проводили до и после подкисления соляной кислотой. Расчет концентрации хлорофилла "а" основывался на известных удельных спектральных показателях поглощения света  $ChL$  (ГОСТ 17.1.4.02-90). Для анализа фитопланктона пробы объемом 1 л фиксировали раствором Люголя и затем концентрировали путем осаждения. Водоросли подсчитывали дважды в камере объемом 0.1 мл под световым микроскопом Amplival с увеличением  $\times 800$  и  $\times 2000$ . Биомассу определяли с учетом объема отдельных клеток (Кожова и Мельник, 1978; Белых и др., 2011).

Из анализа исключались редкие виды фитопланктона, которые за весь период исследований на всех станциях имели встречаемость менее 5%. Статистическая обработка данных велась в PAST 4.17 (Hammer et al., 2001). Видовое разнообразие оценивалось на основе индекса Шеннона и Симпсона. Межгодовая устойчивость видового состава для каждой станции оценивалась на основе индекса Жаккара. Например, сравнивалось как видовой

состав 2017 г. отличается от такового в 2018, 2019, 2020, 2021 и 2022 гг., и так далее с перебором всех возможных комбинаций. Дистанция Брея-Кертиса использовалась при непараметрическом многомерном шкалировании (nMDS) и кластерном анализе. Определение численных параметров границ кластеров производилось на основе метода K-medoids.

Индекс сапробности рассчитывался индекс сапробности конкретного вида по литературным данным (Барина и др., 2006; Водоросли: справочник, 1989). Байкальским эндемикам присваивался индекс 0.4 (ксено-олигосапробион).

### 3. Результаты и дискуссия

#### 3.1. Весенний фитопланктон

##### Видовой состав, разнообразие и биомасса

В весеннем фитопланктоне доминировали диатомовые водоросли. Если рассматривать сообщество фитопланктона по биомассе, то диатомовые были абсолютным доминантами (67,5%), доля золотистых составляла 15%. Средняя биомасса диатомовых в 1, 2, 3 и 4 группах была 756, 561, 713 и 904  $mg/m^3$ , соответственно (Рис. 2). Хотя в 2021 г. на станциях 3 и 4 групп средние биомассы достигали до 1200  $mg/m^3$ . Максимально наблюдаемое значение биомассы (3901  $mg/m^3$ ) было у *St. teyeri* на ст. МРС в 2022 г. Межгодовая изменчивость отклонения осреднённых значений биомасс среди диатомовых весьма значительная, от 163 (1 группа) до 454 (3 группа)  $mg/m^3$ .

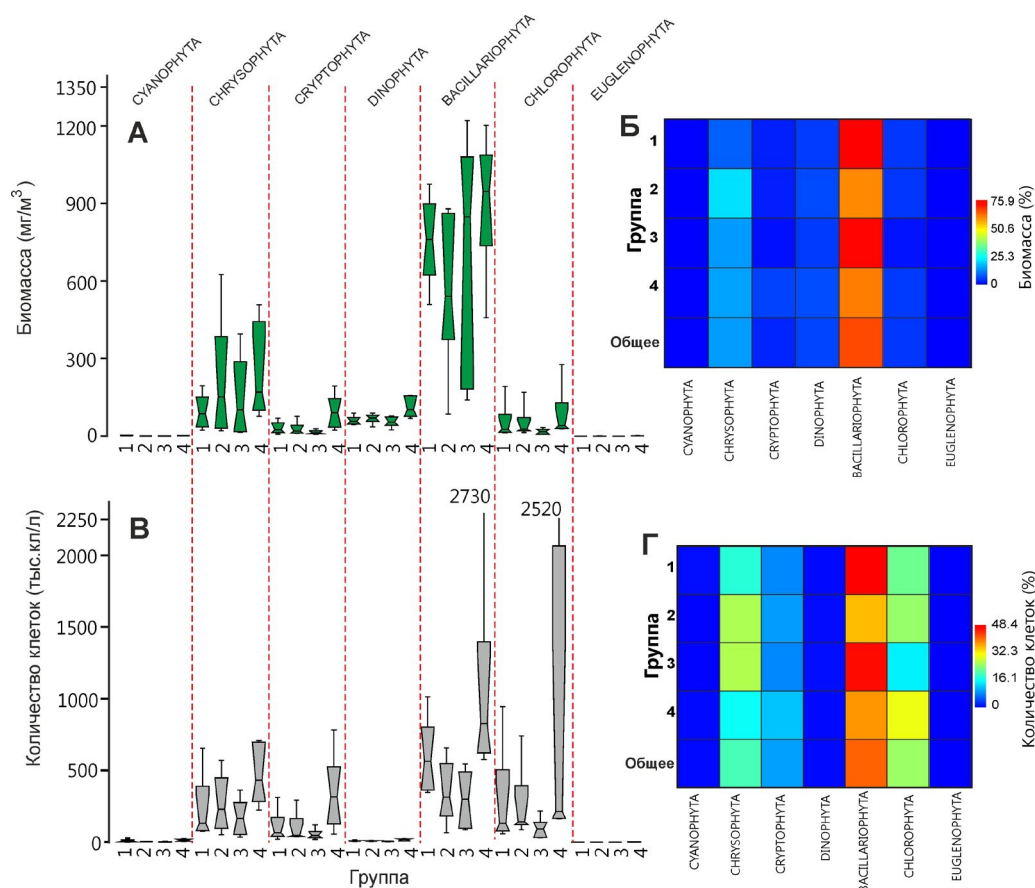


Рис.2. Распределение значений биомассы (А) и численности фитопланктона (В) на станциях разных групп. Осреднённые значения доли таксонов фитопланктона (Б, Г).



Средняя биомасса золотистых водорослей в 1, 2, 3 и 4 группах была 94, 214, 167 и 242 мг/м<sup>3</sup>, соответственно (Рис. 2). Максимальное наблюдаемое значение биомассы (1641 мг/м<sup>3</sup>) было у *Dinobryon cylindricum* Imhof на ст. Арул в 2017 г. Межгодовое отклонение осреднённых значений биомасс среди золотистых варьировало от 66 (1 группа) до 237 (2 группа) мг/м<sup>3</sup>. Средние биомассы других отделов фитопланктона в большинстве случаев не превышали 100 мг/м<sup>3</sup> (Рис. 2). Хотя в единичных случаях могли достигать значительно высоких показателей. Так биомасса зеленой водоросли *Dictyosphaerium pulchellum* Wood была 1179 мг/м<sup>3</sup> в зал. Мухор в 2019 г.

Наибольшие значения биомасс фитопланктона регистрировались на станциях 4 группы, где среднее значение составило 1443 мг/м<sup>3</sup>. Размах колебаний биомасс и их средние значения на станциях 1-3 групп были схожими. Так средние значения были 974, 933 и 945 мг/м<sup>3</sup> для станций 1, 2 и 3 групп, соответственно.

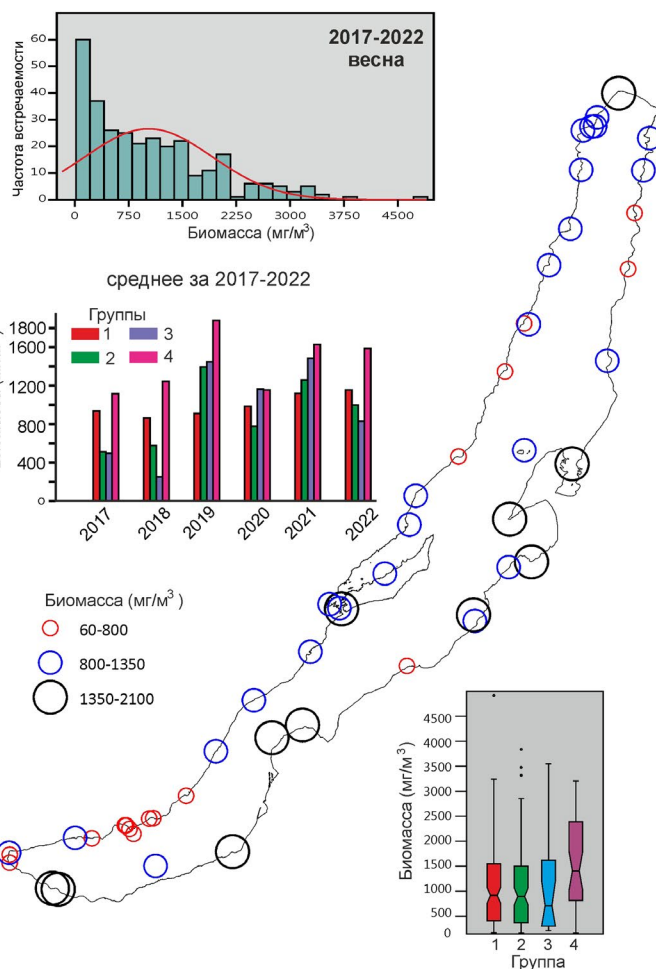
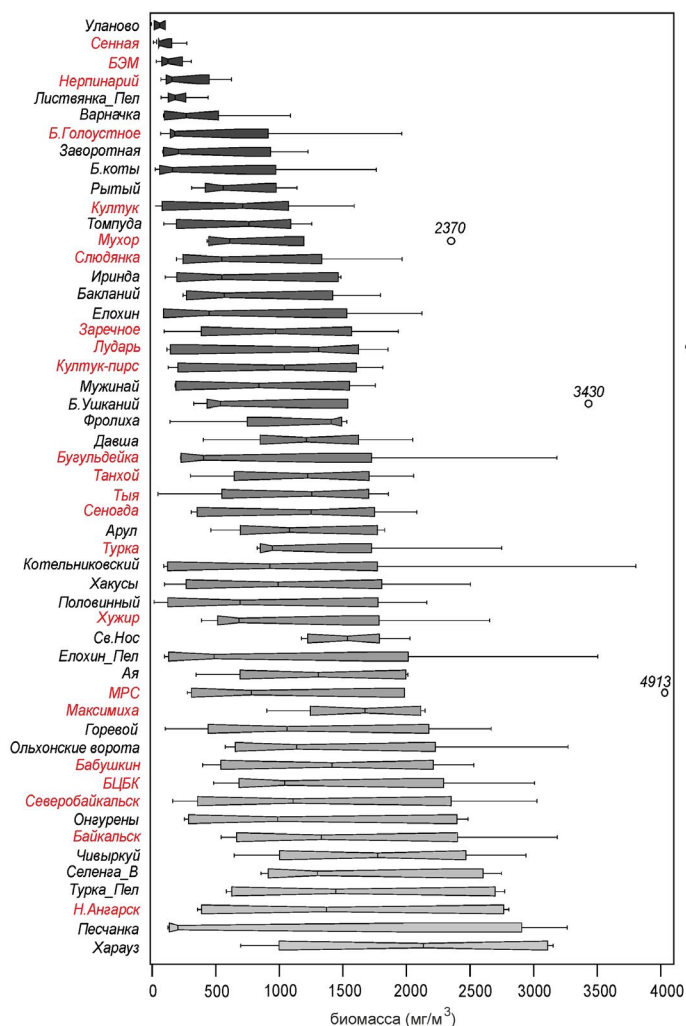
Диапазон межгодовых колебаний значений биомассы фитопланктона на станциях весьма значителен и может достигать несколько тысяч мг/м<sup>3</sup> (Рис. 3). Если рассматривать максимальные значения биомасс, зарегистрированных для каждого года, то среди станций 1-й группы максимум отме-

чен на ст. МРС (4913 мг/м<sup>3</sup>) в 2022 г., хотя в 2021 было 277 мг/м<sup>3</sup>. Для 2-й группы - 3803 мг/м<sup>3</sup> на ст. Котельниковский в 2022 г., а в 2017 эта величина была 92 мг/м<sup>3</sup>. Для 3-й группы - 3505 мг/м<sup>3</sup> на ст. Елохин-Пелагиаль и 97 мг/м<sup>3</sup> в 2018 г. Для 4-й группы - 3154 мг/м<sup>3</sup> на ст. Харауз в 2019 г. и 697 мг/м<sup>3</sup> в 2018 г.

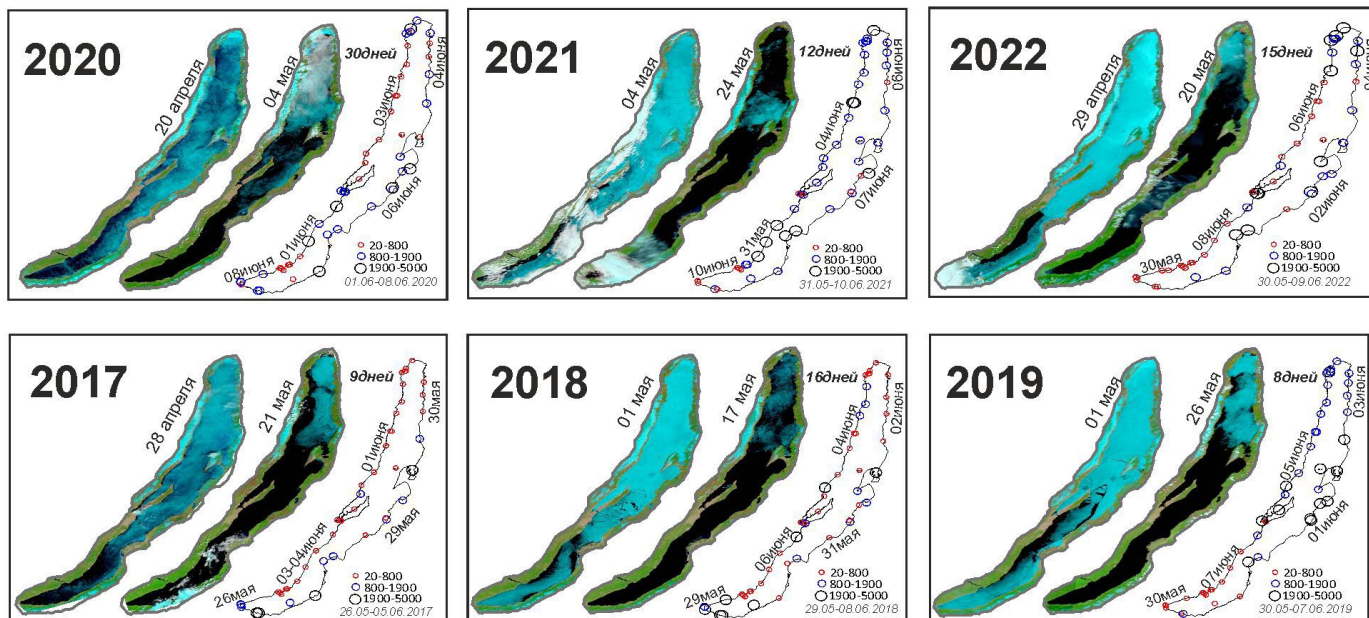
В многолетнем аспекте, наиболее стабильны были станции Южного Байкала в районе пос. Листвянка и Б. Коты. Если рассматривать средние значения биомасс для 2017-2022 гг., то станции можно разделить на три класса: 60-799, 800-1359, и 1360-2100 мг/м<sup>3</sup> (Рис. 3). При этом минимальные значения биомассы регистрировались на станциях, расположенных как с высокой, так и низкой антропогенной нагрузкой

Высокие значения биомасс помимо станций, относящихся к 4-й группе, регистрировались также в районе городов Байкальск, Бабушкин и в районе полуострова Св. Нос (Рис. 3).

Было произведено сравнение интенсивности развития биомассы фитопланктона от продолжительности безледного периода на момент отбора пробы (Рис. 4). Во всех случаях на начало экспедиции Южная котловина около месяца находилась без ледового покрова и низкие значения биомасс на южных станциях могли быть объяснены, что раз-



**Рис.3.** Распределения биомасс по станциям весной 2017-2022 гг. На левой панели станции, выделенные красным цветом, относятся к 1 группе станций, сопряженных с высокой антропогенной нагрузкой.



**Рис.4.** Состояние ледового покрова в момент вскрытия Южной (левый снимок) и Северной (правый снимок) котловин Байкала. Горизонтальные надписи - число дней в котором находилась северная оконечность озера в безледном состоянии на момент проведения экспедиции. На схеме показаны биомассы на станциях и дата отбора проб.

витие фитопланктона находится в завершающей стадии. Однако, это не всегда так происходило в межгодовом аспекте. Например, в 2021 г. на станциях Б. Коты, Б. Голоустное, Песчанка, Бугульдейка регистрировались повышенные биомассы. Станции Северного Байкала на момент опробования чаще всего находились без ледового покрова 12-15 дней, с минимальной продолжительностью 8 дней в 2019 г. и максимальной продолжительностью 30 дней в 2020 г. Однако, и при таких временных разбросах нет однозначной линейной взаимосвязи между значениями биомасс фитопланктона и с момента очищения ото льда до отбора проб. Показательна станция о. Б. Ушканий. В 2019 г. она на момент исследования была в безледном состоянии около 8 дней. Значение биомассы фитопланктона в этот момент было зарегистрировано  $3430 \text{ мг/м}^3$ . Хотя наиболее частые, регистрируемые значения биомасса фитопланктона для этой станции были в диапазоне  $360\text{--}550 \text{ мг/м}^3$ .

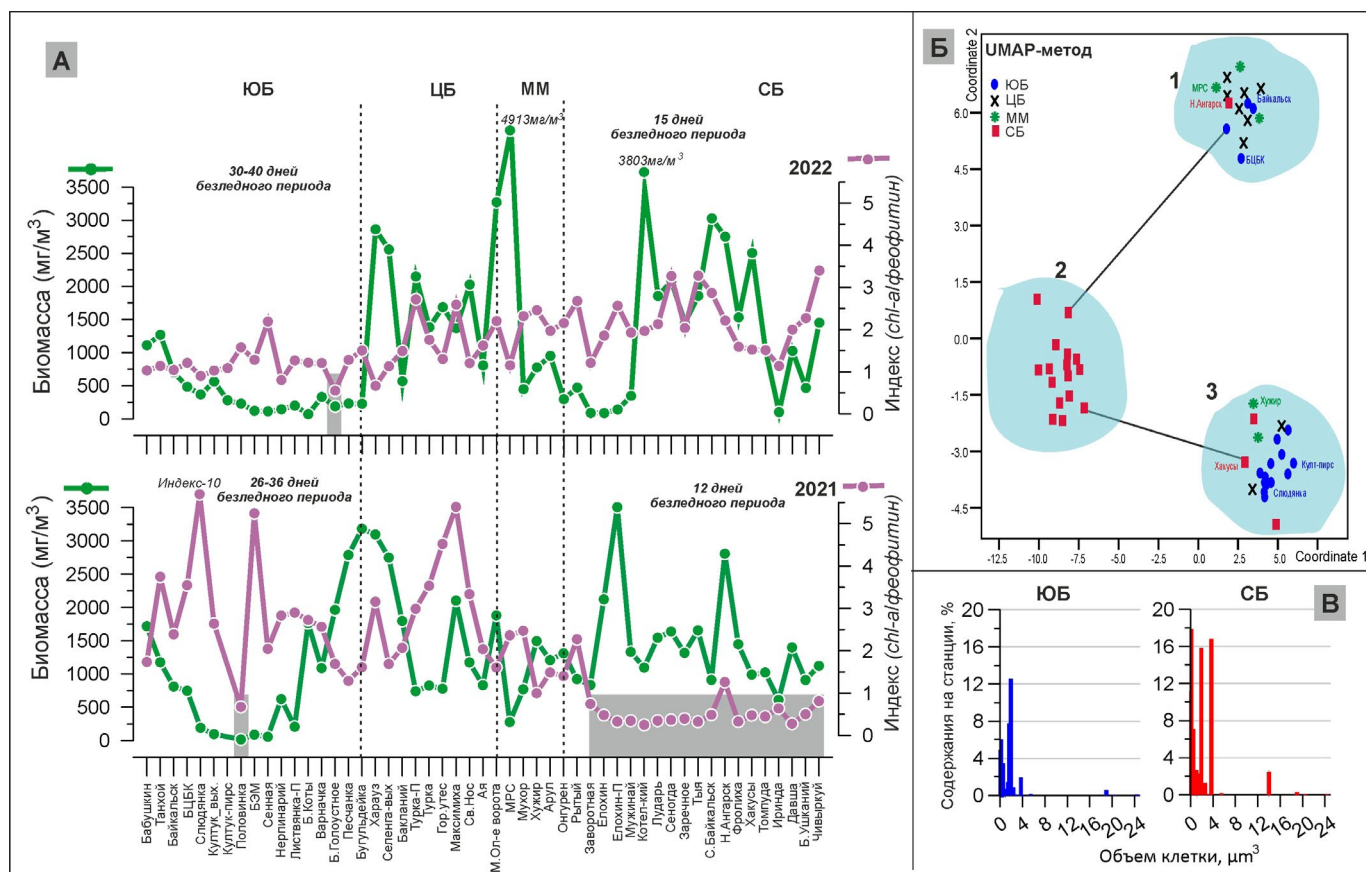
Для характеристики физиологического состояния водорослевого сообщества большое значение имеют данные о содержании феофитина – первичного продукта распада хлорофилла. Старение или распад хлоропластов ведет к разрушению хлорофилла, теряется ион  $\text{Mg}^{2+}$ , что приводит к образованию феофитина. Таким образом, отношение хлорофилла-а к феофитину а ( $\text{chl-a/фео}$ ) меньше 1, указывает на отмирание и разложение водорослей (Бриттон, 1986). Распределение индекса  $\text{chl-a/фео}$  на станциях в 2021 г. показывает весьма странную картину (Рис. 5). Так станции Южного и Среднего Байкала несмотря на то, что на момент пробоотбора находились уже 26-36 дней в безледных условиях имели высокие значения этого индекса, что свидетельствует о «молодом» сообществе фитопланктона. В то время у станций Северного Байкала, который находился в безледных условиях примерно

12 дней, этот индекс был ниже 1, что говорит о «старом» сообществе, хотя биомасса фитопланктона была высокой. Это можно было бы объяснить, что в Южном и Среднем Байкале преобладали мелко-клеточные формы фитопланктона, с высокой скоростью деления клеток и быстро продуцирующие «молодое сообщество» при низкой биомассе. В то время как в Северном Байкале доминировали крупноклеточные формы. Однако, анализ размерности фитопланктона Южного и Северного Байкала, показывает, что основным доминантом в обоих случаях были мелкоклеточные формы с размерами до  $4 \mu\text{м}^3$  и они были более многочисленны в Северном Байкале (Рис. 5). В 2022 и 2023 гг. такого аномального распределения индекса не наблюдалось.

Если сравнивать распределение пигментных характеристик по станциям за 2021-2022 гг. методом UMAP, то можно увидеть три четких кластера (Рис. 5). Только кластер 2 представлен станциями, принадлежащими к одной Северной котловине. Кластеры 1 и 3 представлены станциями всех трех котловин и пролива Малое Море, причем в одном кластере находятся станции, крайне удаленные друг от друга. Например, ст. Хакусы и Култук в кластере 3, или ст. БЦБК и Н. Ангарск в кластере 1. При этом следует отметить, что станции кластеров 1 и 2 крайне непохожи между собой по пигментным характеристикам, хотя имеют географическую близость. Например, ст. БЦБК (кластер 1) и Слюдянка (кластер 3).

Таким образом, мы не находим весомих доказательств того что, продолжительность безледного периода весной является ключевым фактором в развитии весеннего фитопланктона.

Если рассматривать критерий численность клеток, то в доминантах будут диатомовые (42%), зеленые водоросли (26%) и золотистые (20%) (Рис. 2). Средняя численность диатомовых в группах



**Рис.5.** Панель А – соотношение биомассы (зеленая кривая) и индекса - chl-a/фео (сиреневая кривая). Серый прямоугольник – выделяет станции с повышенными значениями феофитина, маркирующие «старение» сообщества фитопланктона. Панель Б – результаты метода UMAP (искалось 10 соседей, min.dist.0.2). Панель В – Распределение фитопланктона по объему клеток. На всех панелях сокращения - Северный Байкал (СБ), Южный Байкал (ЮБ), Средний Байкал (ЦБ), Малое море (ММ).

1, 2, 3 и 4 была 598, 346, 299 и 1091 тыс.кл./л, соответственно. Максимальную численность (9768 тыс. кл./л) среди диатомей имел *Stephanodiscus minutulus* (Kützing) Cleve, Möller в 2021 г. на ст. Селенга-выход. Средняя численность зеленых водорослей в группах 1, 2, 3 и 4 была 284, 253, 95 и 865,5 тыс. кл./л, соответственно. Максимальную численность (7968 тыс.кл./л) показал *Dictyosphaerium* sp. в 2022 г. в Чивыркуйском заливе. Средняя численность золотистых водорослей в группах 1, 2, 3 и 4 была 228, 265, 172, и 464 тыс.кл./л, соответственно. Максимальную численность (5000 тыс.кл./л) среди гаптофитовых имел *Chrysochromulina parva* Lackey на ст. Максимиха в 2020 г. Средняя численность сине-зеленых водорослей не превышала 12,8 тыс.кл./л, криптофитовых - 343 тыс.кл./л, динофитовых - 15,6 тыс.кл./л и евгленовых - 0,2 тыс.кл./л. Фитопланктон был наиболее обилен на станциях 4 группы (Рис. 2).

Видовой состав на станциях не очень богат. Наиболее часто встречаются станции в которых обнаруживается 15-22 вида. Минимальное количество видов (3) было на ст. Сенная в 2017 г. Наиболее высокие значения видового разнообразия 40-45 видов имели станции расположенные в районе дельты Селенги. Видовое разнообразие станций 1-3 групп сопоставимо, но на станциях 1-й группы чаще отмечаются выбросы от среднего значения (Рис. 6). Станции 4-й группы характеризуются наибольшим видовым разнообразием.

Если рассматривать среднееголетние значения, то по видовому богатству станции делятся на три класса в которых количество видов 13-19, 20-26 и 27-41. Станции первого класса численно доминируют. Наиболее часто они встречаются в Южном Байкале и вдоль западного побережья Северного Байкала (Рис. 6). Использование индексов Симпсона и Шеннона, показывает, что с позиции видового разнообразия и доминирования не выявляются значимые различия между всеми четырьмя группами (Рис. 6) в многолетнем аспекте. Хотя распределение индекса Симпсона для станций 1-й группы смещено к невысоким значениям, свидетельствующее, что в некоторые годы на станциях доминировал один вид. Средние значения этих индексов для ряда 2017-2022 гг., показывают, что большинство станций южной и центральной котловин характеризуются невысоким видоразнообразием с преобладанием нескольких видов на станциях.

Среди цианобактерий идентифицировано 16 видов, *Anabaena* Bornet & Flahault (пять видов, один sp.), *Aphanizomenon flos-aquae* Ralfs ex Bornet & Flahault, *Gloeocapsa limnetica* (Lemmermann) Hollerbach, *Gomphosphaeria lacustris* Chodat, *Lyngbya limnetica* (Campbell), *Anagnostidis*, *Marssoniiella elegans* Lemmermann, *Merismopedia tenuissima* Lemmermann, *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont (три sp.), *Phormidium* Kützing ex Gomont (один sp.). *Anabaena* sp. является абсолютным доминантом со средним содержанием



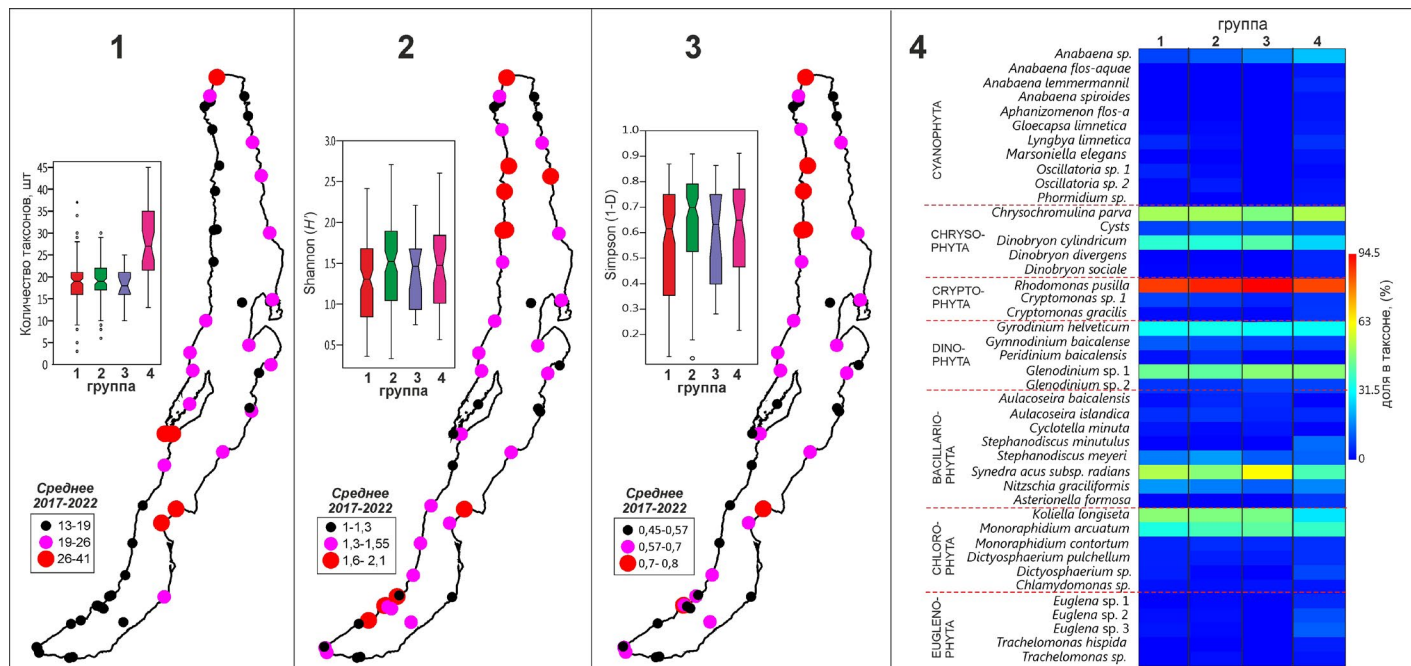


Рис.6. Видовое разнообразие фитопланктона. 1- число видов на станциях, 2-индекс Шеннона, 3 - индекс Симпсона, 4 - среднееголетняя доля вида в своем таксоне (показаны только доминантные виды, численность которых более 4% в таксоне).

8,3, 11,5, 16,7 и 23,9% в группе 1, 2, 3 и 4, соответственно. *L. limnetica* является субдоминантом со средним содержанием 5,8% в 4-й группе (Таблица 2).

Золотистые водоросли были представлены 11 видами: *Chromulina* sp., *Ch. melosirae*, *Chrysosphaerella baicalensis* Popovskaya, *Dinobryon bavaricum* Imhof, *D. cylindricum*, *D. divergens*, *D. sociale* (Ehrenberg), Ehrenberg, *Dinobryon* sp. 1, *Kephyrion* sp., *Mallomonas vannigera* Asmund, *Synura petersenii* Korshikov, и цистами. Среди золотистых и гаптофитовых доминантом является *Ch. parva*, средняя доля которой составляла 47-53% и *Dinobryon cylindricum* (27-36%).

В состав криптофитовых водорослей входили восемь видов: *Rhodomonas pusilla* (Bachmann) Javornický, *Cryptomonas* sp. 1, sp. 2, *C. erosa* Ehrenberg, *C. gracilis* Skuja, *C. marssonii* Skuja, *C. ovata* Ehrenberg, *C. reflexa* (Marsson) Skuja, 1939. Абсолютным доминантом среди криптофитовых является *Rh. pusilla* (98-100%).

Диофитовые представлены шестью видами *Gyrodinium helveticum* (Penard) Takano, Horiguchi, *Gymnodinium baicalense* Antipova, *Peridinium baicalense* Kisselev, Zvetkov, *Peridinium* sp. (euriceps), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2. Среди которых во всех группах доминируют *Glenodinium* sp. 1 (43-48%) и *G. helveticum* (31-34%).

Диатомовые водоросли представлены 27 видами *A. baicalensis*, *A. islandica*, *A. granulata* (Ehrenberg), Simonsen, *Aulacoseira* sp., *Melosira varians* Agardh, *Cyclotella minuta* (Skvortsov) Antipova, *C. baicalensis* Skvortsov, Meyer, 1928, *C. ocellata* Pantocsek, *C. meneghiniana* Kützing, *Cyclostephanos dubius* (Hustedt) Round, *Stephanodiscus minutulus*, *St. hantzschii*, *St. meyeri*, *St. makarova* Genkal, *Stephanodiscus* sp. 1, *Synedra acus* subsp. *radians* (Kützing) Skabichevskij, *S. ulna* (Nitzsch) Ehrenberg, *S. ulna* var. *danica* (Kützing) Van Heurck, *S. acus* Kützing, *N. graciliformis*, *Nitzschia* sp., *Fragilaria crotonensis*

*Kitton*, *F. capucina* Desmazières, *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing, *Diatoma elongatum* (Lyngbye) Agardh, *Asterionella formosa* Hassall, *Ellerbeckia teres* (Brun) Crawford ex Houk & al., а также споры + ауксоспоры. Во всех группах доминировала *S. acus* subsp. *radians* (40-63%), когда минимальная и максимальная ее доля была в 4-й и 3й группах, соответственно. Менее многочисленными (11-19% среди диатомей) были *N. graciliformis* и *St. meyeri*. Доля других диатомовых видов не превышала 7%, а зачастую была меньше 1%.

Самой многочисленной группой были зеленые водоросли (34 вида): *Koliella longiseta* (Vischer) Hindák, *Monoraphidium arcuatum* (Korshikov) Hindák, *M. contortum* (Thuret) Komárková-Legnerová, *Ankistrodesmus* sp. 1, *Elakatothrix genevensis* (Reverdin) Hindák, *Actinastrum hantzschii* Lagerheim, *Binuclearia lauterbornii* (Schmidle) Proshkina-Lavrenko, *Closterium* sp., *C. ehrenbergii* Meneghini ex Ralfs, *C. moniliferum* Ehrenberg ex Ralfs, *Coelastrum microporum* Nägeli, *Cosmarium* sp., *Dictyosphaerium pulchellum*, *Dictyosphaerium* sp., *Kirchneriella intermedia* Korshikov, *Lagerheimia genevensis* (Chodat) Chodat, *Pediastrum boryanum* (Turpin) Meneghini, *P. duplex* Meyen, *P. tetras* (Ehrenberg) Ralfs, *Scenedesmus acuminatus* (Lagerheim) Chodat, *S. acuminatus* var. *biseriatus* Reinhard, *S. bijugatus* Kützing, *S. denticulatus* Lagerheim, *S. obliquus* (Turpin) Kützing, *S. quadricauda* Chodat, *S. acuminatus* var. *elongatus* Smith, *S. sp.*, *Schroederia setigera* (Schröder) Lemmermann, *Sphaerocystis schroeteri* Chodat, *Staurodesmus* sp., *Oocystis lacustris* Chodat, *Oocystis* sp., *Chlamydomonas* sp., *Volvox aureus* Ehrenberg. Несмотря на такое видовое обилие, в значимых количествах среди зеленых водорослей отмечены *K. longiseta* (28-48%, минимум в 4-й группе станций), *M. arcuatum* (34-43%, равномерно распределен по всем группам станций), *M. contortum* (4-6%, равномерно распределен по всем группам



Таблица 2. Численные характеристики видового состава весеннего фитопланктона в 2017-2022 гг.

Вид	Численность (тыс. кл./л)												Биомасса мг/м <sup>3</sup>											
	1-я группа			2-я группа			3-я группа			4-я группа			1-я группа			2-я группа			3-я группа			4-я группа		
	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс
<i>Apabaena</i> sp.	9	7	563	0.52	1.6	32	0.14	1.1	16	0.2	5	34	1.1	0.9	73.2	0.1	0.2	4.2	0.02	0.14	2.08	0.026	0.7	4.4
<i>Apabaena flos-aquae</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	1.3	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.63	0.1	3.8
<i>Apabaena lemmermannii</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0.6	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1615	0.1	1.7
<i>Apabaena spiroides</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.8	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.121	0.1	2.3
<i>Arhanizomenon flos-aquae</i>	0.02	0.0002	0.02	0	0	0	0	0	0	39	1.0	39	0.0002	1.6E-06	0.0002	0	0	0	0	0	0	0.39	0.01	0.4
<i>Gloeocapsa limnetica</i>	0.08	0.001	0.08	0.08	0.001	0.08	0	0	0	0.1	0.1	2	0.01	5.12E-05	0.006	0.01	5.47E-05	0.01	0	0	0	0.008	0.01	0.2
<i>Lyngbya limnetica</i>	0.08	0.4	50	0.38	0.013	1.1	0	0	0	20	2.5	53	0.01	0.05	6	0.04	0.001	0.1	0	0	0	2.2	0.3	5.83
<i>Marssonietta elegans</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0.3	11.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.00	0.01
<i>Oscillatoria</i> sp. 1	2.2	1.5	121	0.41	0.09	6.3	0	0	0	0.2	0.005	0.2	0.6	0.4	35	0.12	0.03	1.8	0	0	0	0.06	0.00	0.06
<i>Oscillatoria</i> sp. 2	9	0.1	9	3.2	0.32	18.2	0	0	0	2.3	0.1	2.3	0.9	0.01	1	0.3	0.03	1.8	0	0	0	0.2	0.01	0.23
<i>Oscillatoria</i>	2.4	0.0	2.4	1.1	0.07	7	0	0	0	0	0	0	0.3	0.002	0.3	0.1	0.01	0.8	0	0	0	0	0	0
<i>Chrysochromulina parva</i>	0.23	177.5	5003	0.06	139	6135	1.15	86	999	0.09	291	3583	0.01	9	250	0.003	7.0	307	0.1	4	50	0.005	15	179
Cysts	0.09	8.7	233	0.02	25.53	483	0.38	13.1	183	0.15	48	1129	0.045	4	117	0.01	13	242	0.2	7	92	0.1	24	565
<i>Dinobryon cylindricum</i>	0.09	42	402	0.08	99	881	0.3	70.6	470	0.1	87	1374	0.17	79	764	0.152	188	1674	1	134	893	0.2	165	2611
<i>Dinobryon divergens</i>	0.13	0.6	65	0	0	0	0	0	0	0.69	22	340	0.14	0.7	72	0	0	0	0	0	0	0.8	24	374
<i>Dinobryon sociale</i>	0.3	0.2	4.12	0.4	0.43	33	0.73	0.04	0.73	0.59	9	114	0.1	0.0	1	0.1	0.1	8	0.2	0.01	0.2	0.1	2	26
<i>Rhodomonas pusilla</i>	0.38	100.8	2991	0.3	93.19	3681	1.75	51.9	268	0.15	336	3480	0.1	21.2	628	0.1	19.6	773	0.4	11	56	0.0	71	731
<i>Cryptomonas</i> sp. 1	0.07	4.3	149.9	0.13	2.98	31.8	0.1	1.5	18	0.1	9	133	0.112	6.8	240	0.2	4.8	51	0.16	2.3	29	0.2	15	213
<i>Cryptomonas gracilis</i>	0.07	0.7	12.5	0.07	1.55	84	0.52	0.5	3.7	0.09	2	18.2	0.14	1.4	25	0.1	3.1	168	1.04	1.0	7.4	0.2	4	36
<i>Gyrodinium helveticum</i>	0.02	1.8	10.4	0.03	2.02	20.3	0.1	1.8	10	0.1	4	17.4	0.38	33.4	197.6	0.6	38.3	386	1.9	33.3	198	1.9	68	331
<i>Gymnodinium baicalense</i>	0.06	0.7	8.6	0.07	0.51	6.63	0.07	0.5	2.9	0.15	0.9	11	1.224	14.8	175	1.4	10.3	135	1.4	11.1	59	3.1	18	224
<i>Peridinium baicalense</i>	0.06	0.1	2.1	0.08	0.46	26	0.2	0.2	1.18	0.1	0.1	1.8	1.464	3.1	51.24	2.0	11.2	634	4.1	4	29	2.4	2	44

Вид	Численность (тыс. кл./л)												Биомасса мг/м <sup>3</sup>											
	1-я группа			2-я группа			3-я группа			4-я группа			1-я группа			2-я группа			3-я группа			4-я группа		
	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс
<i>Glenodinium</i> sp.1	0.1	4.2	193	0.06	3.23	67	0.2	2.6	8	0.68	9	84	0.144	6.1	278	0.1	4.7	96	0.2	4	12	1.0	14	121
<i>Glenodinium</i> sp. 2	0.08	0.4	6.7	0.04	0.43	12	0.2	0.4	4	0.11	1.2	11	0.44	2.0	36.85	0.2	2.4	66	1.0	2.4	22	0.6	6	61
<i>Aulacoseira bacalensis</i>	0.07	2.0	38	0.07	5.05	112	0.04	12.6	192	0.12	1.8	16.5	0.98	27.8	532	1.0	70.7	1568	0.6	176	2688	1.7	25	231
<i>Aulacoseira islandica</i>	0.07	18	312	0.03	15.70	272	0.08	5.5	49	0.15	26	449	0.259	65.2	1153	0.1	58.1	1006	0.3	20	181	0.6	96	1661
<i>Cyclotella minuta</i>	0.06	1.1	48	0.06	0.64	6.1	0.14	1.0	10	0.08	0.4	2.52	0.14	2.5	113	0.1	1.5	14	0.3	2.3	25	0.2	1	6
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.8	6	748	0.26	5.48	624	0.7	0.04	0.7	7.6	413	9768	0.15	1.2	142	0.0	1.0	119	0.1	0.01	0.133	1.4	78	1856
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.1	175	3681	0.1	170.11	2515	0.2	16	155	0.34	95.9	2277	0.10	186	3902	0.1	180.3	2666	0.2	16.6	165	0.4	102	2414
<i>Synedra acuta</i> subsp. <i>raians</i>	0.4	224	1400	0.39	132	1630	0.3	256	1393	0.23	280	1072	0.68	426	2659	0.7	250.9	3097	0.5	486	2647	0.4	533	2037
<i>Synedra ulna</i> var. <i>danica</i>	0.1	1.4	42	0.06	0.80	14	0.08	0.5	5.5	0.15	0.7	3.42	0.20	4.5	138	0.2	2.6	46	0.3	1.7	18	0.5	2.2	11
<i>Synedra acuta</i>	0.3	1.0	39	0.24	1.30	93	1.82	0.1	1.82	0.14	5.2	110	0.07	0.2	8	0.05	0.3	19	0.4	0.02	0.4	0.0	1.0	22
<i>Nitzschia graciliformis</i>	0.1	167	5040	0.15	26	806	0.12	5.4	50	0.07	193.1	1740	0.02	36.8	1109	0.03	5.7	177	0.0	1.2	11	0.0	42	383
<i>Asterionella formosa</i>	0.08	0.8	37	0.17	0.42	14.6	0.38	0.2	2.1	0.07	21.6	335	0.05	0.5	24	0.1	0.3	9	0.2	0.1	1.3	0.0	14	214
<i>Koliella longiseta</i>	0.1	157	3520	0.1	147	4449	0.55	33.7	181	0.29	92.6	1480	0.02	37.6	845	0.02	35.2	1068	0.1	8.1	43	0.1	22	355
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	0.36	42	1004	0.2	47	644	0.91	55.7	460	0.15	94.0	606	0.05	6.3	151	0.03	7.1	97	0.1	8.4	69	0.0	14	91
<i>Monoraphidium contortum</i>	0.08	4.4	98	0.08	12	411	0.1	1.9	30.6	0.11	29.4	518	0.01	0.6	13	0.01	1.6	53	0.0	0.2	4	0.0	4	67
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	2.1	60	3900	0.16	19	1980	29	4.1	45	1.9	247.7	9828	0.25	7.2	468	0.02	2.3	238	3.5	0.5	5.4	0.2	30	1179
<i>Dictyosphaerium</i> sp.	2.5	19.9	815	2640	23	2640	0	0	0	21	349.2	7968	0.03	0.2	8	26.4	0.2	26	0	0	0	0.2	3.5	80
<i>Chlamydomonas</i> sp.	0.09	0.8	27	0.12	4	364	0.08	0.2	1.1	0.21	5.2	68	0.04	0.3	11	0.05	1.6	149	0.0	0.1	0.5	0.1	2.1	28
<i>Euglena</i> sp. 1	0	0	0	0.08	0.001	0.08	0	0	0	0.15	0.01	0.33	0	0	0	0.50	0.004	0.5	0	0	0	0.9	0.1	2
<i>Euglena</i> sp. 2	0.08	0.001	0.08	0.06	0.003	0.26	0	0	0	0.1	0.05	1.47	0.66	0.01	0.7	0.5	0.02	2.2	0	0	0	0.8	0.4	12
<i>Euglena</i> sp. 3	0.08	0.004	0.26	0.3	0.003	0.3	0	0	0	0.09	0.03	0.25	0.38	0.02	1.2	1.4	0.01	1.4	0	0	0	0.4	0.1	1.2
<i>Trachelomonas hispida</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.03	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.025	0.005	0.1
<i>Trachelomonas</i> sp.	0	0	0	0.05	0.001	0.09	0	0	0	2.43	0.06	2.43	0	0	0	0.05	0.001	0.09	0	0	0	2.4	0.1	2.4

станций), *D. pulchellum* (3-6%, равномерно распределен по всем группам станций), и *Dictyosphaerium* sp. с максимум (9%) в 4-й группе станций. Доля других видов была меньше 3%.

Евгленовые водоросли были не многочисленны и представлены *Euglena* Ehrenberg (три sp.), *Trachelomonas hispida* (Perty) Stein, и *Trachelomonas* sp. Наибольшую численность они показали в 4-й группе станций при средних значениях доли *Euglena* sp. 2, sp. 3 9 и 11%, соответственно. Все остальные виды имели средние значения доли меньше 5%.

В сравнительном аспекте по численности фитопланктона на пелагических станциях и рядом с ними расположенными прибрежными станциями (Листвянка-Пел-БЭМ, Сенная, Нерпинарий, Турка-Пел-Турка, Елохин-Пел-Елохин), следует, что только ограниченное число видов в прибрежных станциях незначительно многочисленны по сравнению с пелагиалью. Например, на станциях в районе пос. Листвянка отмечается превышение численности *Chlamydomonas* sp. в 1,6-13 раз, *N. graciliformis* в 3-5 раз, *Ch. parva* в 1,5-3 раза, *A. baicalensis*, *A. islandica*, *Rh. pusilla*, *S. acus* subsp. *radians*, *K. longiseta* и *D. cylindricum* не более чем в 2,5 раза. На станции Елохин превышение в три раза зафиксировано только для *Glennodinium* sp. 1. На станции п. Турка превышение имели только *Ch. parva* в 13 раз и *K. longiseta* в 3,8 раз. Турка является четвертой рекой по объему вод, поставляемых в Байкал, после Селенги, Верхней Ангары и Баргузина.

Если предположить, что р. Баргузин и Баргузинский залив являются источником для разноса фитопланктона в Среднюю и Северную котловины Байкала, то превышение на ст. Максимиха над ст. Св. Нос (м. Нижнее Изголовье) было у *Ch. parva* и *S. acus* subsp. *radians* в три раза. Другой «мар-

керы» переноса такие как *C. ocellata* отсутствовала на обеих станциях, а *St. meyeri* в максимальном количестве 1110 тыс. кл/л был обнаружен на ст. Св. Нос в 2022 г. Для всех других видов на вышеперечисленных станциях превышение было менее чем в два раза или отсутствовало. Таким образом за шесть лет наблюдений, мы не находим подтверждение предположению, что «большая часть видового состава фитопланктона пелагиали в открытом Байкале не живет, а присутствует в связи с выносом из рек, соров и заливов».

Оценивая межгодовую пространственную изменчивость сообществ фитопланктона на основе индекса Жаккара, можно увидеть, что сообщества имеют не устойчивый видовой состав. Характер распределения близок к нормальному и большинство станций показали распределение индекса в диапазоне 0,4-0,55, со средним значением 0,47 (Рис. 7). При таких распределениях нельзя однозначно говорить, что какая-то группа станций имеет более устойчивый межгодовой видовой состав, а какая-то нет. Среди полученных распределений станции 3-й группы имеют меньшую, а 4-й группы большую межгодовую изменчивость. Станции 1-й и 2-й групп характеризуются большим разбросом значения индекса. Для каждой станции был рассчитан процент встречаемости индекса больше 0,47, чтобы оценить, как часто встречаются станции с низкой межгодовой изменчивостью. Это распределение разделило станции на три класса, в которых встречаемость значений индекса больше 0,47 находилось в диапазонах 10-33 % (высокая межгодовая изменчивость), 33-60 (средняя межгодовая изменчивость) и 60-100% (низкая межгодовая изменчивость).

Наибольшей межгодовой изменчивостью характеризуются станции Култук, Байкальск и

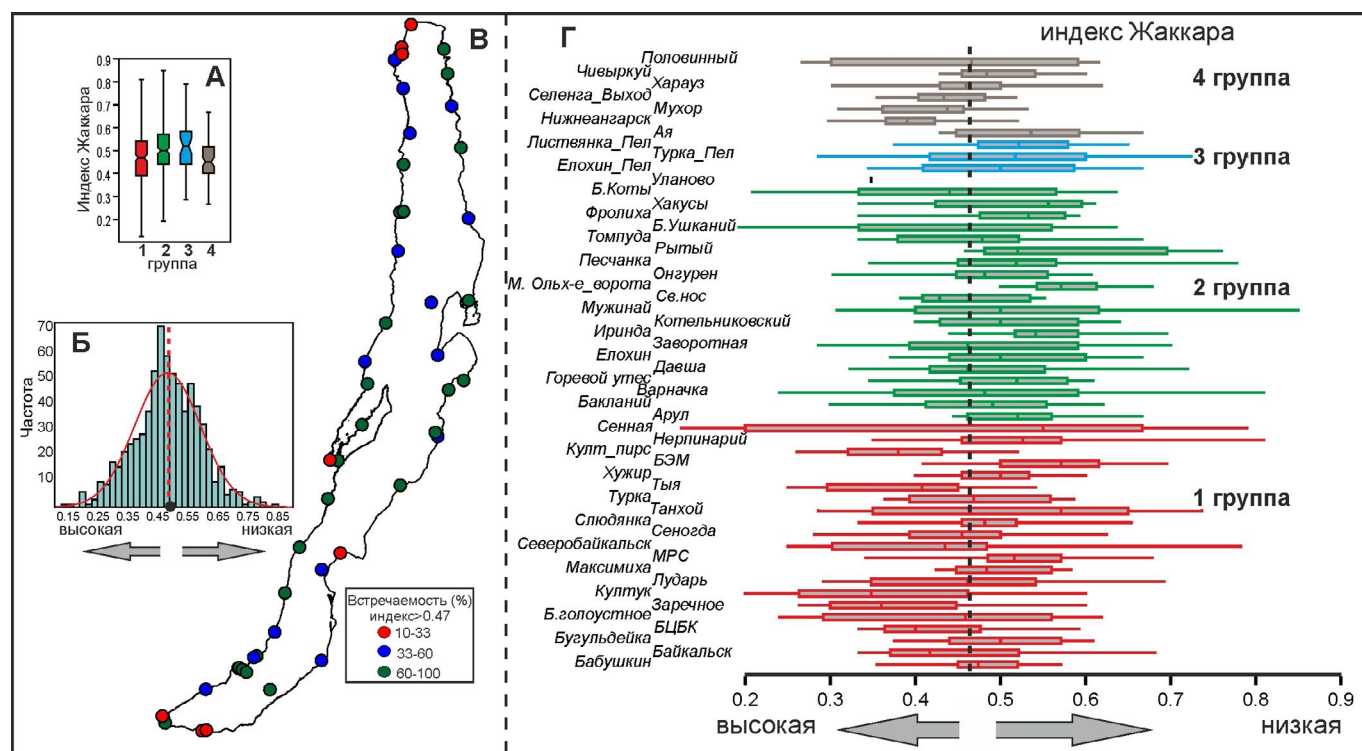


Рис.7. А - распределение индекса Жаккара по группам станций, Б - частота встречаемости индекса Жаккара, В - процент случаев когда межгодовой индекс Жаккара больше 0,47, Г - распределение индекса Жаккара на станциях.

БЦБК, зал. Мухор, Селенга-выход, Нижнеангарск, Северобайкальск, Тья и Сеногда (Рис. 7). Станции Ольхонские ворота, БЭМ, МРС, Рытый, Листвянка-II, Фролиха имели максимально стабильный межгодовой видовой состав. Следует отметить интересный факт того, что две близкие географически станции у п. Култук имели 20% встречаемость индекса более 0,47, а у расположенной в 5 км ст. Слюдянка эта встречаемость была 73%.

Если рассматривать видовой состав по приуроченности к котловинам озера и проливу Малое Море, то можно увидеть, что Южная котловина отделена от других. Большинство станций Северной котловины, расположенные севернее ст. Заворотная также обособлены (Рис. 8). А вот станции Центральной котловины, по видовому составу, схожи с некоторыми станциями Северной котловины и Малого Моря, образуя плотный кластер станций Турка-Пел (Ц), Турка(Ц), Бакланий (Ц), Ая (Ц) Горевой Утес (Ц), Максимиха (Ц), Св. Нос (Ц), Арул (ММ), Онгурен (ММ), Рытый (С), Давша (С).

Если рассматривать различия видового состава исходя из принадлежности станций к какой либо группе, то можно увидеть, что станции 4-й группы Половинный, Селенга-выход, Н. Ангарск и Мухор обособлены от других (Рис. 8). Станции 1-й группы Сенная, Б. Голоустное, МРС, Култук, Слюдянка, и из 2-й группы ст. Уланово обладает некоторой видовой индивидуальностью (Рис. 8). В то время как другие станции всех групп образуют мало различимые «скопления», в которых могут рядом располагаться станции 1-й и 2-й групп. Для проверки гипотезы, что станции 1-й и 2-й групп имеют различия в составе фитопланктона, был использован метод «укорененного кластера» (Рис. 8). Оказалось, что видовой состав станции Елохин близок к составу фитопланктона на станциях Култука, Слюдянки, Байкальска, а станция Хужир близка по видовому составу станциям Иринда, Хакусы и т.д (Рис. 8).

Более того если провести корреляционный анализ по годам, то обнаружатся еще более разнообразные корреляционные связи. На Рисунке 8 показаны коэффициенты корреляции ( $r > 0,5$ ) станции Слюдянка с другими станциями. Так в 2018 г. была тесная корреляционная связь со станциями без антропогенной нагрузки Ая, Арул, Бакланий, Онгурен, Б. Ушканий, Половинный. В разные годы набор коррелирующих станций разный. Например, в 2019 г. станция Слюдянка имела высокие корреляции только с 4 станциями, а в 2020 г. уже с 34 станциями.

Также были проверены среднемноголетние взаимосвязи между группами станций по видам фитопланктона, которые считаются показателями эвтрофикации водоемов, а именно *Anabaena* sp., *A. flos-aquae*, *Anabaena macrospora* Klebahn, *Anabaena scheremetievi* Elenkin, *L. limnetica*, *Oscillatoria* sp. 3, *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *D. sociale*, *R. pusilla*, *Cryptomonas* sp. 1, *Cryptomonas* sp. 2, *C. gracilis*, *C. marssonii*, *C. ovata*, *C. reflexa*, *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, *Glenodinium* sp. 2, *Stephanodiscus minutulus*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Stephanodiscus* sp. 1, *K.*

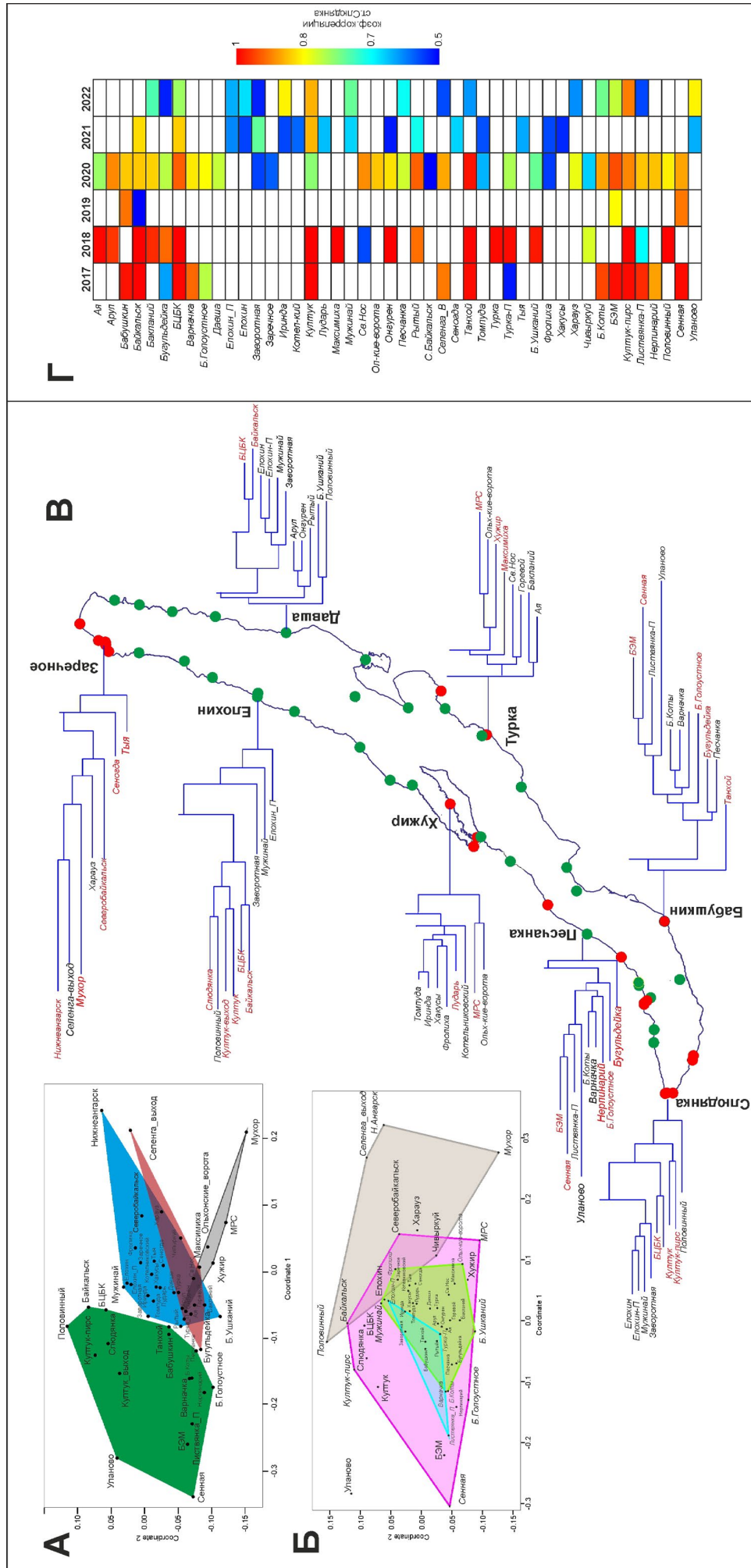
*longiseta*, *M. arcuatum*, *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp. 1, *Euglena* sp. 2, *Euglena* sp. 3, *T. hispida*, *Trachelomonas* sp.

В сообществах мелкоклеточного фитопланктона выявлены среднемноголетние различия на станциях Нижнеангарск, Северобайкальск, Тья, Харауз, Селенга-Выход, Б. Голоустное, Св. Нос, Давша, МРС, Мухор. Различия для других станций независимо от их групповой принадлежности минимальное (Рис. 9).

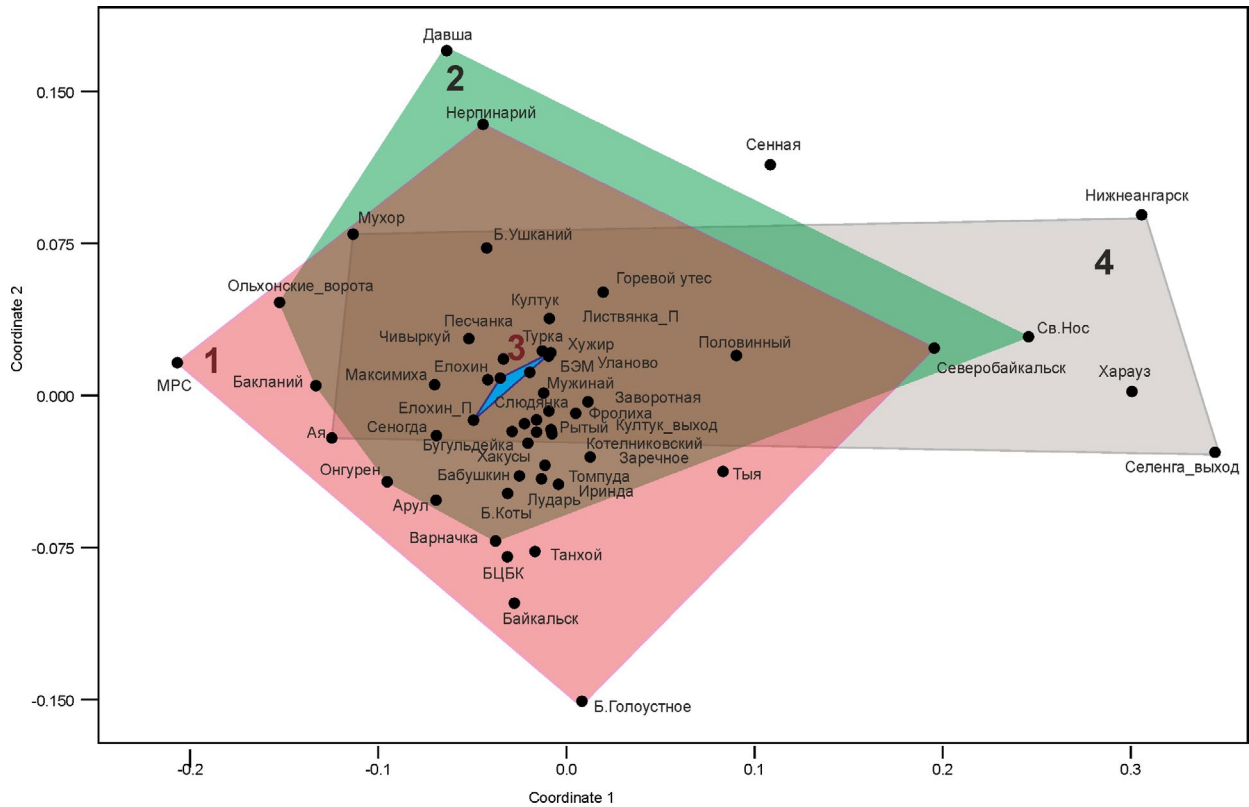
В июне 2013 г. регистрировались зеленые водоросли рода *Chlamydomonas* в количестве 100 тыс.кл./л у станций Култук и Слюдянка, до 23 тыс. кл./л у п. Листвянка и 56-140 тыс.кл./л в п. Б. Коты, в Центральной и Северной котловинах 1-10 тыс. кл./л (Бондаренко и Логачева, 2016). В наших исследованиях, из всего ряда наблюдений (301 станция) высокая численность *Chlamydomonas* sp. регистрировалась только в 3% случаев на станциях: Давша (2017 г.) - 363, Мухор (2019 г.) - 68, Харауз (2019 г.) - 55, Нижнеангарск (2020 г.) - 45, Ольхонские\_ворота (2017 г.) - 31,2, Нерпинарий (2017 г.) - 26,9, Сеногда (2017 г.) - 19,3, Б. Ушканий (2017 г.) - 15,5 и Ольхонские\_ворота (2021 г.) - 9,2 тыс.кл./л. На 239 станциях (79 %) численность *Chlamydomonas* sp. была менее 1 тыс.кл./л. Высокие значения численности *Chlamydomonas* sp. пришлось на 2017 г. На станции Б.Коты в период подледного цветения в 2015 г. его численность доходила до 7 млн кл./л. (Бондаренко и Логачева, 2016), и вероятнее всего, высокая численность *Chlamydomonas* sp. на станции Давша в 2017 г объясняется остаточным явлением после подледного цветения. На станциях Култук, Слюдянка, Байкальск их численность была не выше 0,7 тыс. кл./л, а зачастую они вовсе отсутствовали. Таким образом мы не находим подтверждений, что в весенний период *Chlamydomonas* sp. массово развивается в литоральной зоне, особенно на участках, сопряженных с населенными пунктами.

Также было проведен анализ по распределению нанопланктонных форм динофлагеллят *Peridinium* sp. и *Glenodinium* sp. 1, sp. 2. В межгодовом аспекте наименьшей частотой встречаемости характеризуются *Peridinium* sp. (не более чем на 30% станций) и *Glenodinium* sp. 2, при этом в некоторые годы они отсутствовали (Рис. 10). Численность этих видов тоже низкая, со среднемноголетним показателем 0,8 тыс.кл./л, за исключением станций Малого моря. Максимальная численность отмечена для *Peridinium* sp. (21 тыс.кл./л) на станции Нижнеангарск в 2022 г., а для *Glenodinium* sp. 2 (12 тыс.кл./л) на станции Елохин в 2021 г. Абсолютным доминантом, как по частоте встречаемости (90-100%), так и по численности, является *Glenodinium* sp. 1 (Рис. 10). Максимально наблюдаемая численность 193 тыс.кл./л была на станции МРС в 2020 г. Для станций Малого Моря характерна высокая численность этого вида. Также высокие значения численности *Glenodinium* sp. 1 были обнаружены на станциях Нижнеангарск и Елохин 84 и 67 тыс.кл./л соответственно. Но даже, с учетом этих высоких значений, среднемноголетняя численность этого вида составила 4,4 тыс.кл./л.





**Рис. 8.** А – Разделение станций по котловинам озера (зеленое поле – Южная котловина, синие поле – Северная котловина, коричневое поле - Центральная котловина) и Малого Моря (серое поле) по видовому составу фитопланктона на основе метода непарметрического многомерного шкалирования pMDS. Б - разделение станций исходя из их групповой принадлежности (сиреневое поле – 1-я группа, оливковое поле – 2-я группа, голубое поле – 3-я группа, серое поле – 4-я группа). В - дендрограмма на основе метода укороенного кластера. Крупные надписи – станции от которых начинается кластер. Г- станции, имеющие корреляцию со ст. Слюдянка при  $r > 0,5$  в межгодовом аспекте.

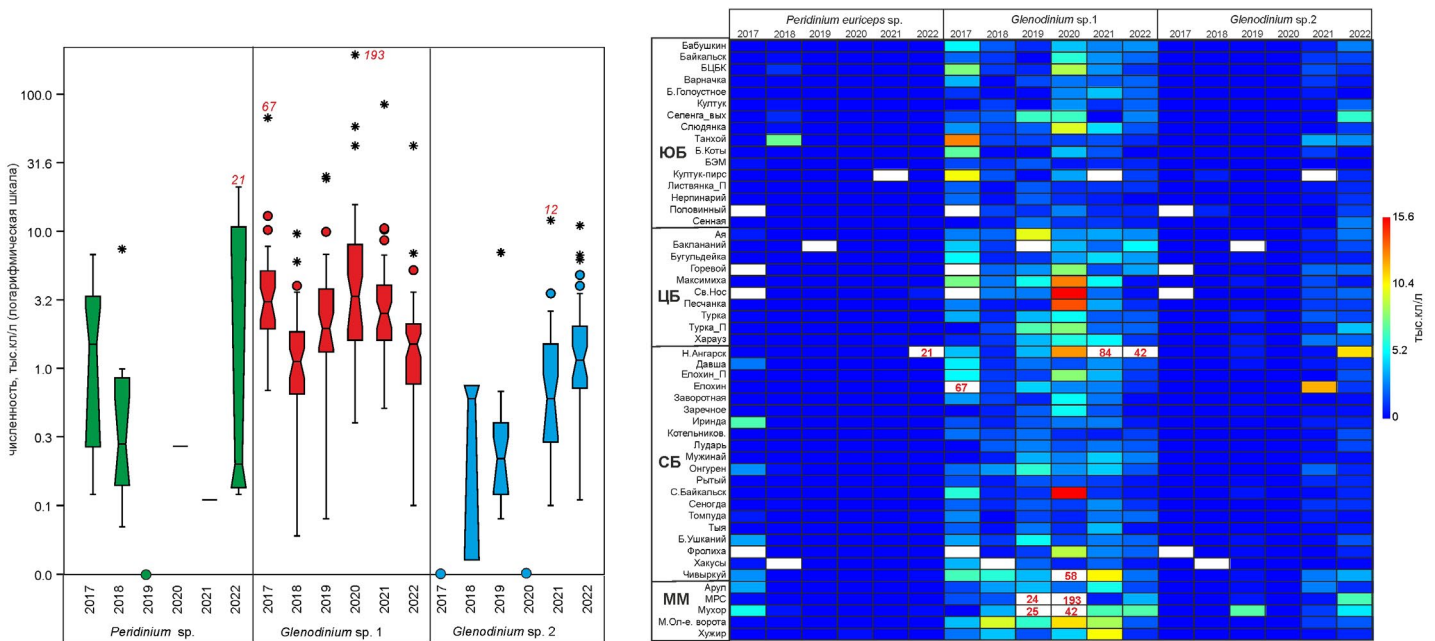


**Рис.9.** Распределение весеннего мелкоклеточного фитопланктона исходя из групповой принадлежности станций (метод nMDS). Цифрами обозначены группы станций.

Если рассматривать, среднемноголетние значения численности этих трех видов динофлагелат на всех станциях, то кластерный анализ выделяет три группы станций. Первая группа включает станции с высокой численностью динофлагелат. И к ним относятся станции МРС, Елохин, Чивыркуй и Н. Ангарск. Вторая группа включает станции с численностью до 3 тыс. кл/л, и третья группа включает станции с крайне низкой численностью. При этом станции с различной антропогенной нагрузкой находятся во всех трех группах (Рис. 11).

Таким образом, на основе видового состава весеннего фитопланктона не удастся надежно идентифицировать части акватории литорали Байкала по степени антропогенной нагрузки.

Рассмотрев распределения основных продуцентов биомассы весеннего фитопланктона, как прошлых лет (*A. baicalensis*), так и настоящего (*S. acus* subsp. *radians* (синедра)) обнаружены следующие особенности. Синедра наиболее обильна в Центральной котловине и южной оконечности озера на участке Култук-Бабушкин (Рис. 12). Также на



**Рис.10.** Межгодовая динамика численности динофлагелат *Peridinium* sp., *Glenodinium* sp. 1, sp.2. ЮБ – Южный Байкал, ЦБ – Центральный Байкал, СБ – Северный Байкал, ММ – Малое море.

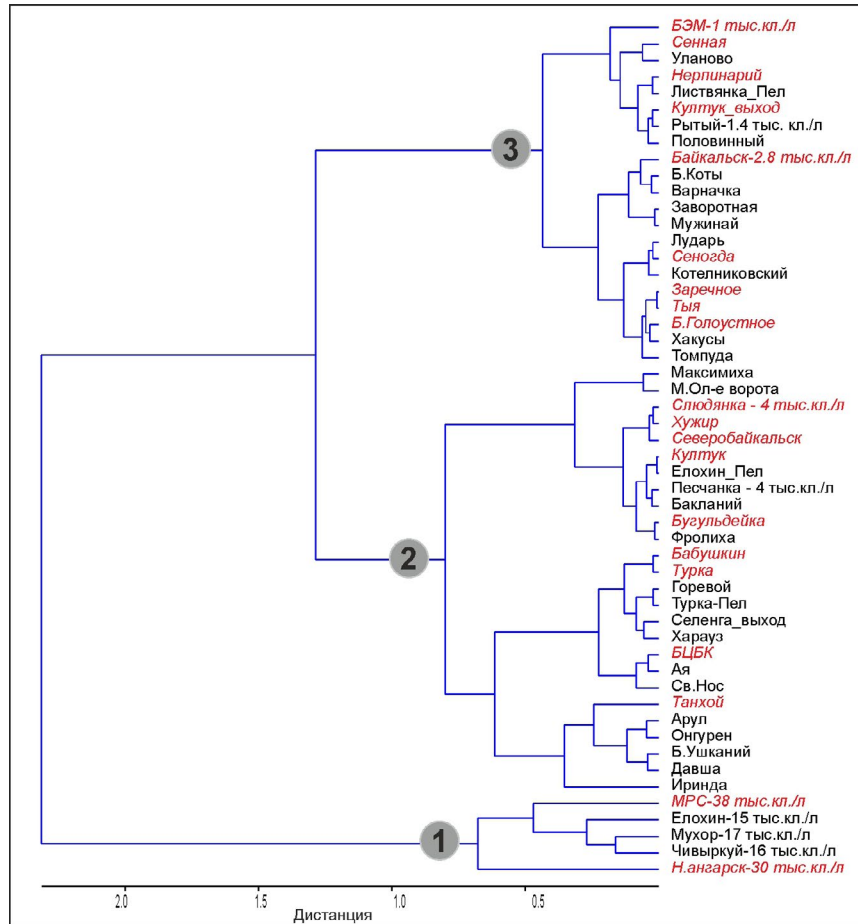


Рис.11. Кластеризация станций на основе численности динофлагелат *Peridinium* sp., *Glenodinium* sp. 1, sp.2. Красным показаны станции 1й группы.

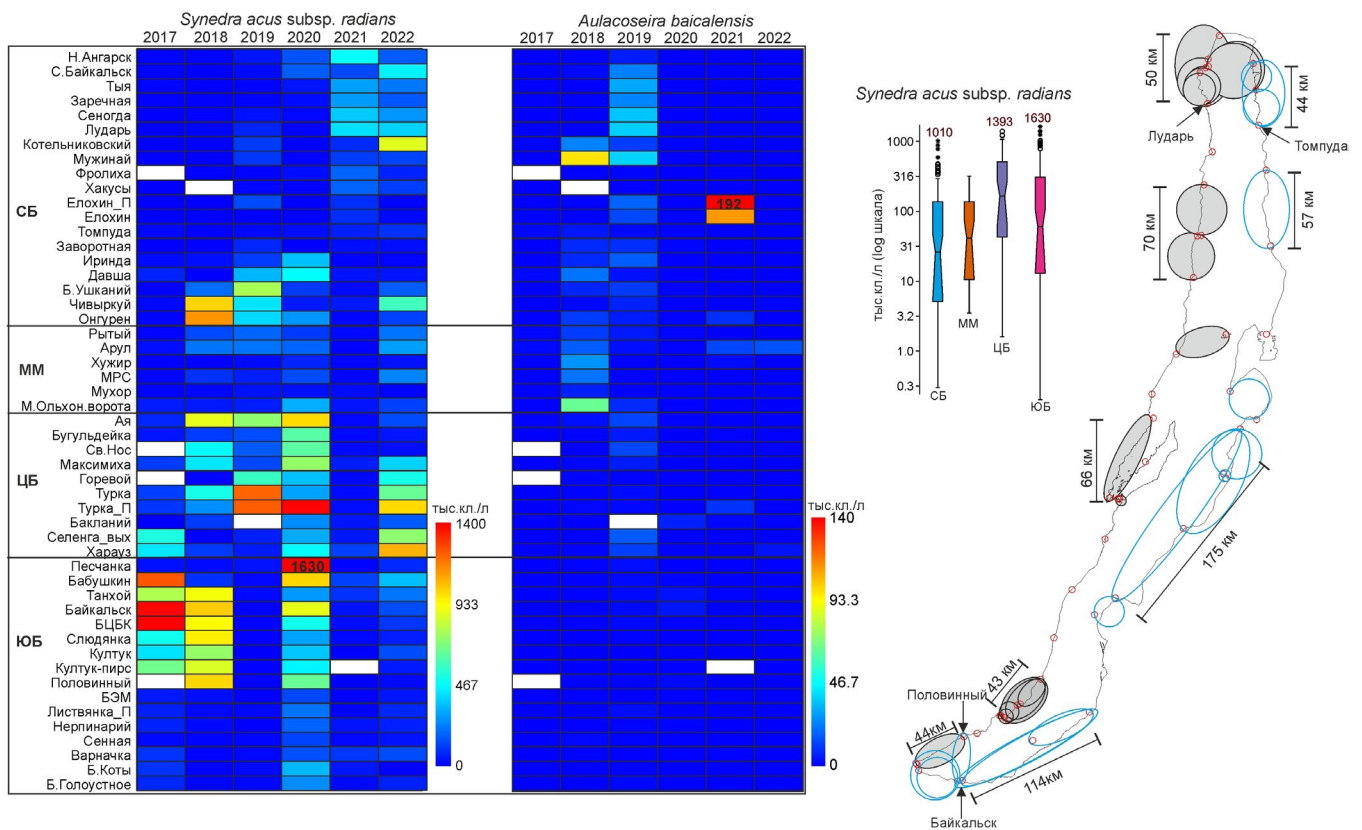


Рис.12. Распределение численности *Synedra acus* subsp. *radians* и *Aulacoseira baicalensis* на станциях в межгодовом аспекте. ЮБ - Южный Байкал, ЦБ - Центральный Байкал, СБ - Северный Байкал, ММ - Малое Море. На правой карте-схеме соединены смежные станции с высокой корреляцией  $r > 0,6$  в распределении численности *Synedra acus* subsp. *radians*.

этом участке чаще всего наблюдается высокая численность синедры. Однако, за весь период наблюдений максимальная численность (1630 тыс.кл./л) зарегистрирована в 2020 г. на станции Песчанка. Ранее отмечалось, что наиболее обильна синедра бывает два года подряд, далее идет резкий спад ее численности (Калюжная и Антипова, 1974). В нашем исследовании на некоторых станциях также наблюдался двухлетний максимум численности синедры. Но важно отметить, что эти максимумы были не синхронными в разных частях озера и даже в пределах одной котловины. Например, массовое развитие в 2017-2018 гг. синедры проходило на участке Половинный - Бабушкин. В то время как на участке Листвянка - Б. Голоустное и в Северной котловине (за исключением станций Чивыркуй и Онгурен) синедры была минимальной (Рис. 12). В 2020 и 2022 гг. наиболее часто на станциях отмечалась высокая численность синедры.

Диапазон колебаний численности синедры на станциях не может быть объяснен разностью концентраций биогенных компонентов на станциях. Так, например, в 2017 г. на станциях Байкальск и Сеногда регистрировалось 1387 и 0,7 тыс.кл./л, соответственно, а концентрация  $P_{\text{мин}}$  была 8 и 5 мкг/л и  $N_{\text{мин}}$  - 68 и 87 мкг/л (Bondarenko et al., 2020). Отсутствие связи между химическими показателями и количественными значениями фитопланктона Байкала отмечено и ранее в ряде работ (Помазкина и др., 2010; Поповская и др., 2015).

Мы не сможем корректно сравнить полученные данные с исследования прошлого века, поскольку в литературных данных чаще всего приводится только интегральная оценка численности и биомассы для слоя воды в 0-25 м. Тем не менее приведен несколько данных в сравнительном аспекте с 1964-1969 гг (Вотинцев и др., 1975). Так, в северной котловине она колебалась от 0,1 до 56 тыс.кл./л, а сейчас от 8,2 до 209 тыс.кл./л, хотя на некоторых станциях могло быть и 0,3-0,4 тыс.кл./л. В средней котловине от 3 до 57,8 тыс.кл./л, а сейчас 35 до 608 тыс.кл./л, и в южной котловине от 0,1 до 699 и от 7,4 до 489 тыс.кл./л, соответственно в эти периоды. При этом максимальная численность в 1080 тыс.кл./л была зарегистрирована в июне 1969 г, а сейчас нередко значения и в 1100-1400 тыс.кл./л (Рис. 12).

На основе корреляционного анализа было исследовано насколько географически наблюдается сходство в распределении синедры от станции к станции. Брались только связи с  $r > 0,6$ . Рис. 12 показывает пространственную гетерогенность распространения синедры. Наиболее схоже синедра развивается на северной оконечности озера между станциями Лударь – Томпуда, и в южной оконечности между станциями Байкальск-Половинный. При этом высокие корреляционные связи существуют между станциями западного и восточного побережья. Например, станции Тья и Заречное коррелируют со станциями Хакусы и Фролиха, а Байкальск со станцией Половинный. Вдоль западного побережья синхронно развивается синедра на участках между станциями Мужинай-Заворотная,

Рытый - Б. Ушканий, Арул – Ольхонские ворота и Листвянка - Б. Голоустное. Вдоль восточного побережья это участки Давша - Иринда, Максимиха-Св. Нос, и далее в южном направлении все станции в Центральной и Южной котловинах формирует ареалы 175 и 114 км, соответственно (Рис. 12).

Такое равномерное распределение синедры вдоль восточного побережья в Южной и Центральной котловинах, вероятнее всего, объясняется более пологим рельефом в результате чего создаются более однородные гидродинамические условия на больших площадях.

*A. baicalensis* в исследуемый период практически на всех станциях находилась в минорных количествах, чаще всего с нулевыми значениями или не более 3 тыс.кл./л. При этом чаще всего она отмечалась в Малом Море и на Северном Байкале (Рис. 12).

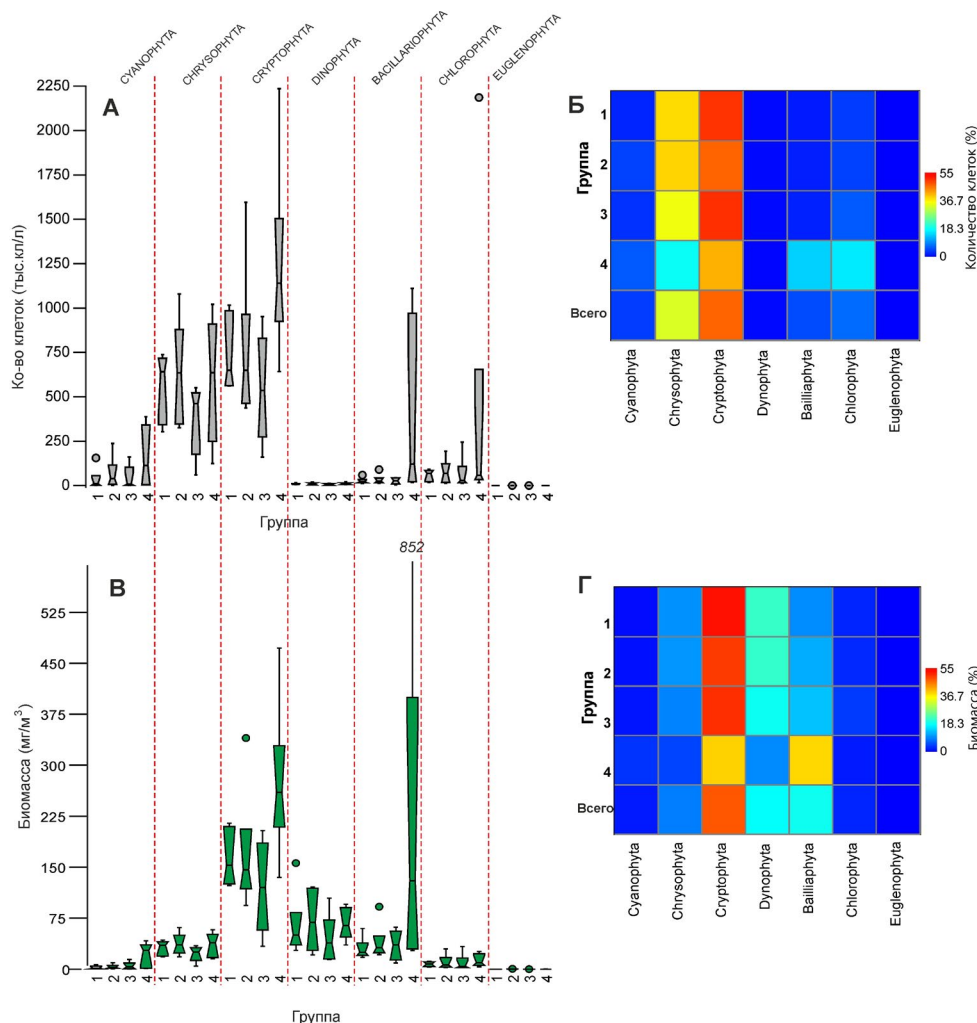
### 3.2. Осенний фитопланктон

#### *Видовой состав, разнообразие и биомасса*

Рассматривая численные показатели фитопланктона на уровне отдела, можно отметить, что во всех группах, наибольшую численность и биомассу имели криптофитовые водоросли, когда эти показатели могли достигать до 2235 тыс.кл./л и 472 мг/м<sup>3</sup>, соответственно (Рис. 13). В сообществах фитопланктона криптофитовые водоросли занимали до 45,5%. Золотистые водоросли при высокой численности доходящей до 1000 тыс.кл./л имели небольшую биомассу, зачастую ниже 50 мг/м<sup>3</sup>. В противоположность этому, динофитовые виды при низкой численности давали биомассу 50-100 мг/м<sup>3</sup> (до 16% от общей биомассы). Для диатомовых водорослей высокие значения этих показателей характерны только для четвертой группы станций. Вклад цианобактерий (2,2% биомассы), зеленых (2,5% биомассы) и эвгленовых (<1% биомассы) водорослей в биомассу фитопланктона не высокий (Рис. 13). Таким образом, с позиции численности осенний фитопланктон литоральной зоны Байкала может быть характеризован доминантой сообщества золотисто-криптофитовых водорослей, а с позиции биомассы как сообщество криптофитовых водорослей.

Наиболее часто встречаемой величиной биомассы были значения 260-300 мг/м<sup>3</sup> (Рис. 14). Наибольшую изменчивость значений биомассы показывают станции 4-й группы. Например, в акватории дельты Селенги в межгодовом аспекте биомасса изменялась от 350 до 4700 мг/м<sup>3</sup>. Распределение значений биомасс, на основе метода K-medoids позволяет охарактеризовать станции следующим показателям биомассы: станции с биомассами 20-260, 290-1000 и 1100-4700 мг/м<sup>3</sup>. Как следует из Рисунка 14 средние значения биомассы в диапазоне 20-260 мг/м<sup>3</sup> характерны для большинства станций литорали Байкала. Однако, в некоторые годы станции восточного побережья имели большую биомассу фитопланктона по сравнению со станциями западного побережья, например, в 2021 году.





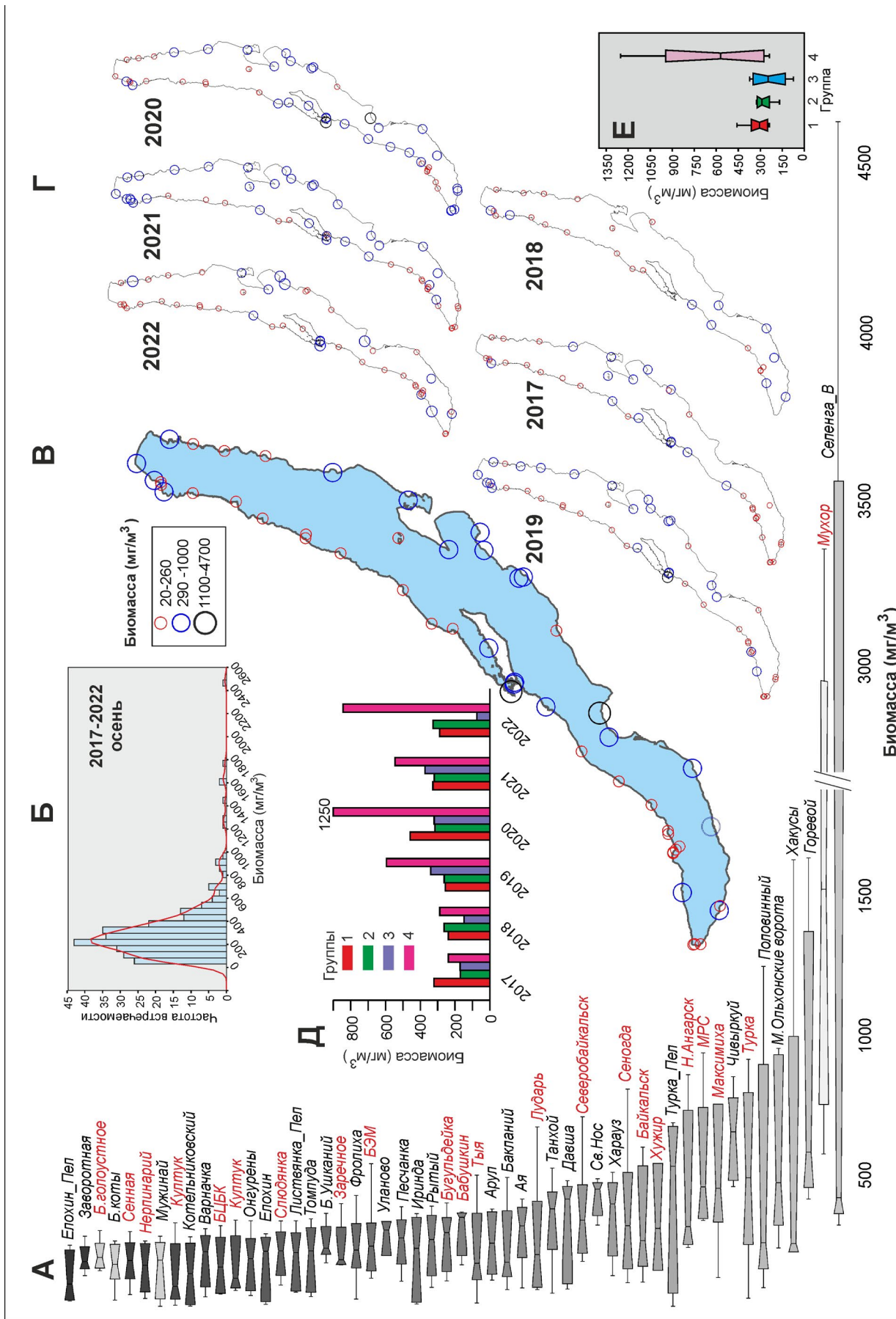
**Рис.13.** Показатели осеннего фитопланктона 2017-2022 гг. Распределение значений численности (А) и биомассы фитопланктона (В) на станциях разных групп. Панели Б и Г отражают осреднённые значения доли отделов фитопланктона.

В межгодовой динамике, значения биомассы станций 1,2 и 3 групп не показывают сильную вариабельность, средние значения лежат в диапазоне 240-315 мг/м<sup>3</sup>. Также не обнаруживается различий в биомассах фитопланктона из акваторий, расположенных вблизи населенных пунктов, и с низкой антропогенной нагрузкой. Например, биомассы фитопланктона на станциях Елохин-Пелагиаль, Листвянка-Пелагиаль (3 группа), Заворотная, Б. Коты, Котельниковский, Мужинай (2 группа) и Листвянка (Сенная, Нерпинарий), Култук, Слюдянка, БЦБК (1 группа) были минимальными из всех станций наблюдений (Рис. 14).

За весь период наблюдений, минимальное и максимальное число обнаруженных видов было 11 и 50, соответственно (Рис. 15). Ряд средних значений числа видов для 2017-2022 гг. делит станции отбора на три разновидности. Первая – станции с 17-22 видами, вторая – станции с 22-26 видами и третья – станции с 26-36 видами. Согласно этой градации, станции Южной котловины и западного побережья Северной котловины до мыса Котельниковский менее таксономически разнообразны (Рис. 15). Использование индексов Симпсона и Шеннона, показывает, что с позиции видового разнообразия и доминирования не выявляются значимые различия между всеми четырьмя группами (Рис. 15) в мно-

голетнем аспекте. Средние значения этих индексов для периода 2017-2022 гг., показывают, что большинство станции Южной и Центральной котловин характеризуются невысоким видоразнообразием с преобладанием всего нескольких видов на станции. Станции Северной котловины более разнообразны и с более «выровненным» распределением численности в таксонах (Рис. 15). Число видов в 1-й и 2-й группах практически идентичное, а более высокие показатели таксономического разнообразия характерны для станций 4-й группы.

Несмотря на обилие видового состава, число видов-доминантов (по численности) не слишком большое (Рис. 15). Численные характеристики видов, со встречаемостью более 2% представлены в Таблица 3. Так среди цианобактерий идентифицировано 22 таксона, принадлежащих родам *Anabaena* (четыре вида, один sp.), *Aphanizomenon* (один вид), *Gloeocapsa* (два вида, один sp.), *Gomphosphaeria* (один вид), *Lyngbya* (один вид), *Marssonella* (один вид), *Merismopedia* (три вида), *Microcystis* (один вид), *Oscillatoria* (три sp.), *Phormidium* (один sp.), *Tetrapedia Reinsch* (один sp.). Среди цианобактерий *Microcystis pulvereae* (Wood) Forti, (11-24%), *A. spiroides* Klebahn, 1895 (5-19%) и *A. lemmermannii* Richter (8-19%) были доминантами.



**Рис.14.** Распределение биомассы осеннего фитопланктона. **А** - на индивидуальных станциях за 2017-2022 гг., **Б** - частота распределения биомассы фитопланктона, **В** - средние значения биомассы за период наблюдения 2017-2022 гг. и в отдельные годы (**Г**). **Д** - среднее распределение биомассы на станциях, принадлежащих разным группам. **Е** - распределение биомассы на станциях, принадлежащих разным группам за весь период наблюдений.



Таблица 3. Численные характеристики видового состава осеннего фитопланктона в 2017-2022 гг

Вид	Численность (тыс. кл./л)												Биомасса (мг/м <sup>3</sup> )											
	1 группа			2 группа			3 группа			4 группа			1 группа			2 группа			3 группа			4 группа		
	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс
<i>Anabaena</i> sp.	2.1	0.4	14	0.52	0.5	20	1.8	0.11	1.8	1.7	7.66	114	0.17	0.03	1.1	0.04	0.04	1.6	0.14	0.01	0.14	0.14	0.61	9.12
<i>Anabaena flos-aquae</i>	0.7	1.2	30	0.70	0.7	14.2	2.3	0.14	2.3	0.6	7.06	96	0.11	0.18	4.4	0.11	0.10	2.13	0.35	0.02	0.35	0.09	1.06	14.40
<i>Anabaena lemmermannii</i>	0.19	2.0	80	0.10	2.7	48	0.23	0.58	2.9	0.08	15.29	239	0.04	0.41	16.0	0.02	0.55	9.6	0.05	0.12	0.58	0.02	3.06	47.80
<i>Anabaena scherermetjevi</i>	0.34	0.7	16	0.50	2.8	140	0.23	0.90	5	0.66	25	665	0.11	0.23	5.2	0.17	0.93	46	0.08	0.30	1.65	0.22	8.25	219
<i>Anabaena spiroides</i>	0.34	0.8	27	0.34	1.7	60	1.6	2.78	11.2	0.08	19	214.2	0.09	0.21	7.3	0.09	0.45	16.2	0.43	0.75	3.02	0.02	5.08	58
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	3	0.3	10	0.10	0.5	15	2.9	0.18	2.9	0.08	0.19	4	0.04	0.00	0.1	0.00	0.01	0.18	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.05
<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	4.6	1.3	96	4.30	0.4	9.6	12.8	1.60	12.8	5.5	7.04	180	4	1.12	84	3.78	0.38	8	11	1.41	11.26	4.84	6.20	158
<i>Lyngbya limnetica</i>	1.6	0.5	14	3	0.6	34.2	1.61	0.10	1.61	1.82	1.05	40	0.11	0.03	1.0	0.21	0.04	2	0.11	0.01	0.11	0.13	0.07	2.80
<i>Microcystis pulverea</i>	28	29	380	34	51.8	680	40	28	400	30	99	1360	0.11	0.12	1.5	0.14	0.21	2.72	0.16	0.11	1.60	0.12	0.40	5.44
<i>Oscillatoria</i> sp. 1	0.95	0.3	9	2.00	0.7	41.2	1.93	5.37	84	5.19	0.31	7.2	0.16	0.05	1.5	0.34	0.12	7	0.33	0.91	14.28	0.88	0.05	1.22
<i>Oscillatoria</i> sp. 2	5	0.0	5	2.60	0.5	36.9	0	0.00	0	6.2	0.16	6.2	0.52	0.00	0.5	0.27	0.05	4	0.00	0.00	0.00	0.64	0.02	0.64
<i>Oscillatoria</i> sp. 3	1.7	0.0	3	0.75	0.2	12.2	0	0.00	0	0	0.00	0	0.10	0.00	0.2	0.05	0.01	0.732	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Phormidium</i> sp.	1	0.1	6.4	1.00	0.3	5.6	0	0.00	0	0.44	0.85	20	0.34	0.03	2.2	0.34	0.10	2	0.00	0.00	0.00	0.15	0.29	6.73
<i>Tetrapedia reischiana</i>	0.07	0.0	0.2	0.07	0.0	2.3	0.08	0.02	0.2	0.07	0.04	0.6	0.01	0.00	0.0	0.01	0.01	0.46	0.02	0.00	0.04	0.01	0.01	0.12
<i>Chrysochromulina parva</i>	0.8	545	1901	0.80	522	4094	12	390	998	14.5	542	1725	0.04	27.24	95.1	0.04	26.09	205	0.58	20	50	0.73	27	86
Cysts	0.45	3.2	22	0.15	3.6	28	0.7	5	27.5	0.16	4	24	0.23	1.61	11.0	0.08	1.80	14	0.35	2.54	14	0.08	1.92	12.00
<i>Rhodomonas pusilla</i>	9	715	3608	1.80	629	6358	13	573	1438	16.3	1219	5569	1.89	150	758	0.38	132	1335	3	120	302	3.42	256	1169
<i>Gyrodinium helveticum</i>	0.09	2.3	42	0.08	2.2	11	0.15	1.82	6.9	0.06	2	9.4	1.31	33	613.2	1.17	31.92	161	2	27	101	0.88	34	137
<i>Glenodinium</i> sp. 1	0.3	5.3	26	0.10	5.3	44.8	0.28	4.16	15.4	0.4	7.51	102	0.47	8.34	40.6	0.16	8.30	70	0.44	6	24	0.62	12	159
<i>Glenodinium</i> sp. 2	0.11	0.7	7.5	0.08	0.7	11.2	0.15	0.62	5.6	0.07	0.63	5	0.32	2.09	21.6	0.23	1.92	32	0.43	1.78	16	0.20	1.81	14
<i>Ceratium hirundinella</i>	0.08	0.4	9	0.06	0.3	4.8	0.08	0.23	2.25	0.07	0.36	2.43	4	22	477.0	3.18	18.03	254	4	12	119	4	19	129
<i>Aulacoseira granulata</i>	0.06	1.6	52	0.08	3.8	119	0.11	5.29	39.2	0.07	1.12	16	0.15	4.00	127.9	0.20	9.26	293	0.27	13	96.43	0.17	2.74	39
<i>Cyclotella minuta</i>	0.11	4.4	32.6	0.08	3.2	39	0.22	5	22.1	0.11	3	23.9	0.17	6.90	51.5	0.13	5.01	61	0.35	8	34.92	0.17	4.26	38



Вид	Численность (тыс. кл./л)												Биомасса (мг/м <sup>3</sup> )											
	1 группа			2 группа			3 группа			4 группа			1 группа			2 группа биомасса			3 группа			4 группа		
	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс	мин	ср-е	макс
<i>Cyclostephanos dubius</i>	0.08	0.1	2.3	0.08	0.2	4	0.08	0.53	4	0.13	50	1920	0.09	0.12	2.6	0.09	0.18	4.48	0.09	0.60	4.48	0.15	55.45	2150
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	0.08	1.9	70	0.16	1.3	146	1	1.74	24.3	7	242	5904	0.02	0.39	14.8	0.03	0.27	31	0.21	0.37	5.10	1.47	51	1240
<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	0.08	0.1	8.1	0.08	0.1	6.5	0.16	0.06	0.58	0.86	33	1230	0.04	0.05	4.1	0.04	0.04	3	0.08	0.03	0.29	0.43	16	615
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.08	0.1	1.5	0.08	0.2	19.1	0.11	0.13	2	0.08	0.88	29	0.07	0.08	1.3	0.07	0.19	16	0.09	0.11	1.68	0.07	0.74	24
<i>Synedra acus</i> subsp. <i>Radians</i>	0.07	3.0	101	0.08	1.4	12.6	0.08	2.14	10	0.15	3	14.4	0.13	5.37	183.8	0.15	2.55	23	0.15	4	18	0.27	4.71	26
<i>Nitzschia graciliformis</i>	0.08	1.8	20	0.07	2.7	35	0.19	1.50	10	0.11	9	115	0.02	0.44	5.0	0.02	0.69	9	0.05	0.38	2.5	0.03	2.15	29
<i>Fragilaria crotonensis</i>	0.08	1.4	70	0.05	3.5	328	0.14	0.20	1.7	0.2	78	2033	0.12	2.15	106	0.08	5.29	492	0.21	0.30	2.6	0.30	117	3050
<i>Asterionella formosa</i>	0.08	11.4	689	0.05	12.0	714	0.09	7.49	50	0.08	15	121	0.06	8.21	496	0.04	8.62	514	0.06	5.39	36	0.06	11	87
<i>Koliella longiseta</i>	0.09	10.7	121	0.08	14.3	179	0.23	12.40	141	0.1	15	260	0.02	1.92	21.8	0.01	2.57	32.22	0.04	2.23	25.38	0.02	3	47
<i>Monoraphidium arcuatum</i>	0.15	21.6	188	0.07	22.3	423	0.42	51.09	600	0.17	19	133	0.02	2.80	24.4	0.01	2.90	54.99	0.05	6.64	78	0.02	2	17
<i>Monoraphidium contortum</i>	0.08	3.6	98	0.08	2.6	28	0.24	2.08	19.5	0.15	9.09	196	0.01	0.40	10.8	0.01	0.28	3.08	0.03	0.23	2.15	0.02	1.00	22
<i>Elakotothrix genevensis</i>	0.08	0.4	3	0.10	0.4	2.82	0.1	0.35	0.97	0.08	0.74	9.2	0.01	0.05	0.4	0.01	0.05	0.37788	0.01	0.05	0.13	0.01	0.10	1.23
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	0.4	15.3	468	0.27	17.7	1460	2.4	2.41	13	0.7	6.22	48	0.02	0.82	25.3	0.01	0.96	78.84	0.13	0.13	0.71	0.04	0.34	2.59
<i>Dictyosphaerium</i> sp.	460	4.2	460	2.10	0.2	7	0	0.00	0	4.32	432	17280	4.60	0.04	4.6	0.02	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	4.32	173
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.1	0.6	6	0.19	0.5	3.8	0.3	0.53	3.5	0.13	1.41	9.6	0.03	0.18	1.9	0.06	0.15	1.178	0.09	0.16	1.09	0.04	0.44	2.98
<i>Scenedesmus</i> sp.	0.28	0.5	21	0.08	1.6	48	0.14	0.12	1.8	0.32	0.48	9	0.06	0.10	4.4	0.02	0.33	10.08	0.03	0.03	0.38	0.07	0.10	1.84
<i>Schroederia setigera</i>	0.13	0.1	2.2	0.06	1.1	58	0.22	0.58	5.7	0.15	0.94	10.2	0.01	0.02	0.2	0.01	0.12	6.38	0.02	0.06	0.63	0.02	0.10	1.12
<i>Chlamydomonas</i> sp.	0.1	1.9	36	0.07	1.2	7.8	0.26	0.93	3.1	0.16	2.05	9.8	0.05	0.92	17.3	0.03	0.58	3.744	0.12	0.45	1.49	0.08	1	4.70
<i>Euglena</i> sp. 1	0.08	0.001	0.08	0.07	0.001	0.09	0	0	0	0.09	0.01	0.11	0.12	0.00	0.1	0.10	0.00	0.1314	0	0	0.00	0.13	0.01	0.16
<i>Euglena</i> sp. 2	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.08	0	0.004	0.16	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.14	0.29	0.01	0.29
<i>Euglena</i> sp. 3	0	0	0	4.8	0.04	4.8	0	0	0	0.09	0.005	0.09	0	0	0	11.04	0	11.04	0	0	0	0.21	0.01	0.21
<i>Phacus caudatus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.003	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.22	0.01	0.22

Золотистые и гаптофитовые водоросли были представлены 11 видами, родов *Chrysochromulina* (два вида), *Dinobryon* (четыре вида), *Mallomonas* (один вид, один sp.), *Synura* (один вид, один sp.) и цистами. Среди золотистых единственным доминантом являлся *Ch. parva* (93-97%).

Криптофитовые представлены восемью таксонами *Rhodomonas* (один вид), *Cryptomonas* (пять видов, два sp.), среди которых абсолютным доминант был *Rh. pusilla* (98-100%).

Дианофитовые водоросли были еще менее разнообразны. Среди них обнаружены 7 таксонов родов *Gyrodinium* (один вид), *Gymnodinium* (один вид), *Peridinium* (один вид, один sp.), *Glenodinium* (два sp.), *Ceratium* Schrank (один sp.), с доминированием *Glenodinium* sp. 1 (57-63%) и *Gyrodinium helveticum* (23-30%).

Диатомовые водоросли являются многочисленным и разнообразным сообществом, состоящим из 29 видов. Отдел диатомовых состоит из родов: *Aulacoseira* (три вида, один sp.), *Melosira* Agardh (один вид), *Cyclotella* (четыре вида), *Cyclostephanos* (один вид), *Stephanodiscus* (три вида, один sp.), *Synedra*, *Nitzschia* (один вид, один sp.), *Fragilaria* (два вида), *Tabellaria* (один вид), *Diatoma* (один вид), *Asterionella*, *Ellerbeckia*, *Acanthoceras* (один вид), *Urosolenia* (один вид), споры и ауксоспоры. В видовом составе среди диатомовых доминантами были *C. minuta* (17-35%), *S. acus* subsp. *radians*, *A. formosa* (22-23%), *N. graciliformis* (7-16%) и в группе 4 - *Fragilaria crotonensis* (15%) наиболее обильна в заливах Мухор и Чивыркуй.

Сообщество зеленых водорослей является еще более многочисленным и разнообразным сообществом, чем диатомовые и состоит из 38 таксонов, относящихся к родам *Koliella* (один вид), *Monoraphidium* Komárková-Legnerová (два вида), *Elakatothrix* Wille (один вид), *Actinastrum* Lagerheim (один вид), *Binuclearia* Wittrock (один вид), *Closterium* Nitzsch ex Ralfs (три вида), *Coelastrum* Nägeli (один

вид), *Cosmarium* Corda ex Ralfs (один вид, один sp.), *Crucigenia* Morren (три вида), *Dictyosphaerium* Nägeli (один вид, один sp.), *Kirchneriella* (один вид), *Lagerheimia* Chodat, 1895 (один вид), *Pediastrum* Hegewald (четыре вида), *Scenedesmus* Meyen (шесть видов, один sp.), *Sphaerocystis* Chodat, (один вид), *Staurastrum* (один sp.), *Oocystis* (один вид, один sp.), *Tetraëdron* Kützing (один вид), *Chlamydomonas* (один sp.), *Chlorella* Beyerinck [Beijerinck], 1890 (один вид). Среди зеленых водорослей *M. arcuatum* (39-49%) и *K. longiseta* (16-22%) были доминантами.

Евгленовые водоросли крайне однородны и малочисленные, и представлены только тремя родами *Euglena* Ehrenberg (три sp.), *Phacus* Dujardin (один вид), *Trachelomonas* Ehrenberg (один sp.). Выделение среди евгленовых водорослей доминантов не представляется корректным ввиду их низкой численности и редкой встречаемости.

Используя индекс Жаккара было протестировано насколько видовой состав фитопланктона на каждой станции изменяется в межгодовом аспекте. Так видовой изменчивость фитопланктона увеличивается на станциях по направлению индекса от 0,45 к 0,15, и наоборот стабильность видовой состава возрастает при показателях от 0,45 к 0,8 (Рис. 16). Примером станций с высокой межгодовой изменчивостью сообществ фитопланктона являются Байкальск, Култук, Фролиха, Томпуда, а низкой МРС, Мухор, Ольхонские ворота, Бугульдейка (Рис. 16). Для каждой станции также было рассчитано как часто межгодовые различия имели индекс Жаккара больше 0,45. На основе этого расчет было выделено три типа станций. Первый тип – 23 станции с высокой межгодовой стабильностью видовой состава фитопланктона (60-100% случаев, когда индекс Жакара был более 0,45). Второй тип – 17 станций с умеренной изменчивостью видовой состава (33-60% таких случаев). Третий тип - 12 станций с крайне нестабильным межгодовым составом (10-33%). Таким образом, большинство

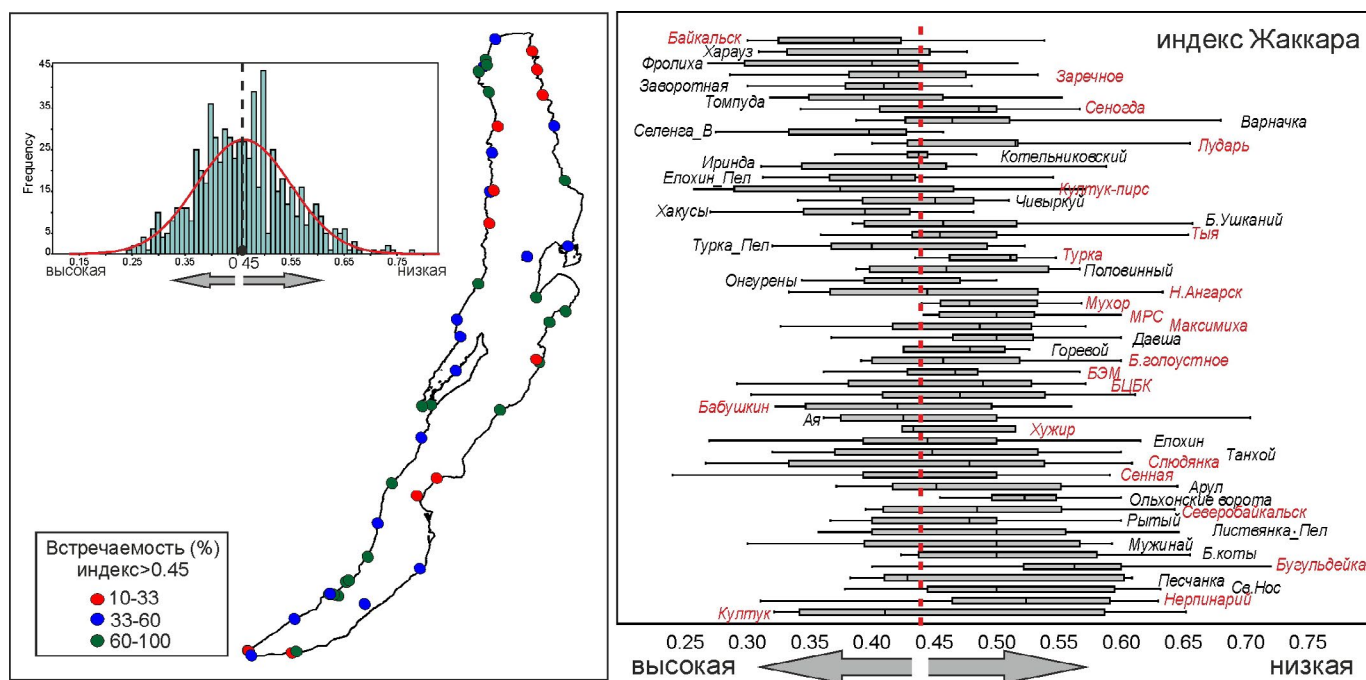


Рис.16. Распределение индекса Жаккара в осеннем фитопланктоне.

исследованных участков литорали озера имели стабильный или умеренно изменчивый видовой состав сообществ фитопланктона в межгодовом аспекте (Рис. 16). Наименее стабильный состав фитопланктона обнаружен на станциях Северного Байкала. Наименьший показатель стабильности (10%) имели станции Елохин-Пелагиаль, Заворотная и Байкальск.

На основе метода непараметрического шкалирования была изучена возможность разделения котловин Байкала и четырех экологических групп на основе видовой состава фитопланктона. Как следует из Рисунка 17, большинство станций имеют схожий видовой состав независимо от географической приуроченности. Хотя станции Среднего Байкала за исключением станций Бугульдейка и Ая несколько обособлены от других станций. Это можно объяснить влиянием рек Селенга, Турка и Баргузин, поставляющих большое количество органического вещества в эти районы акватории. Наиболее отличный видовой состав имели станции Мухор, Чивыркуйский залив, Максимиха и Селенга-Выход. Такое же распределение свойственно и четырем экологическим группам, когда большинство станций образуют, одно, «неразделимое скопление» и обособленность станций Мухор, Чивыркуйский залив и Селенга-Выход (Рис. 17).

Дополнительно был использован метод «укорененного кластера». В качестве начальных точек построения кластеров были выбраны станции первой и второй групп (Рис. 17). Например, станция Заречное является одним из мест Байкала с яркими проявлениями эвтрофирования в виде аномального цветения фитобентоса и массовыми выбросами в зону пляжа органического детрита (Timoshkin et al., 2018). Видовой состав фитопланктона этой станции очень схож с таковым как на станциях первой группы, так и на станциях второй группы (Рытый, Св. Нос, Уланово). Или же на станции Слюдянка, сопряженной с одноименным городом (население 18 тыс. чел) видовой состав фитопланктона ожидаемо близок к таковому на станции Култук и фоновых станциях Северного Байкала и даже на пелагической станции (Елохин-пелагиаль).

Приведем пример корреляции ( $r > 0,5$ ) видовой состава фитопланктона ст. Слюдянка с другими станциями. Следует отметить, что в весенней съемке количество станций, имеющих высокую корреляцию со ст. Слюдянка было 47, в осеннюю съемку - 51. Наибольшее число станций со схожим видовым составом, как на ст. Слюдянка, было в 2020 и 2021 гг. - 47 и 46 станций, соответственно, а наименьшие в 2017 и 2022 гг. - 18 и 6 станций, соответственно. При этом, в 2017 и 2022 гг. выявлены низкие корреляции с близкорасположенными станциями Култук, Байкальск, БЦБК и высокие корреляции со станциями Северного Байкала - Елохин, Котельниковский и дельтой р. Селенга.

Также была проверены среднесезонные взаимосвязи между группами станций по видам фитопланктона *Anabaena* sp., *A. flos-aquae*, *A. macrospora*, *A. scheremetievi*, *L. limnetica*, *Oscillatoria*

sp. 3, *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *D. sociale*, *R. pusilla*, *Cryptomonas* sp. 1, *Cryptomonas* sp. 2, *C. gracilis*, *C. marssonii*, *C. ovata*, *C. reflexa*, *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, *Glenodinium* sp. 2, *Stephanodiscus minutulus*, *St. hantzschii*, *Stephanodiscus* sp. 1, *K. longiseta*, *M. arcuatum*, *Chlamydomonas* sp., *Euglena* sp. 1, *Euglena* sp. 2, *Euglena* sp. 3, *T. hispida*, *Trachelomonas* sp.

Результаты nMDS показывают, что, как и в весеннюю съемку, нет четкой дифференциации сообществ мелкоклеточного фитопланктона на станциях, принадлежащих разным группам (Рис. 18). Наибольшие отличия видовой состава мелкоклеточного фитопланктона отмечается на станциях Мухор, Максимиха, Турка, Турка-Пелагиаль, Горевой утес, Бакланий, Селенга-выход, Харауз. То есть на станциях, расположенных вблизи устьев рек и в заливах.

По сравнению с весенним фитопланктоном численность *Chlamydomonas* sp. осенью была низкая. Из 283 точек наблюдения, относительно высокая численность была на станциях: Байкальск (2018 г.) - 36, Селенга выход (2017 г.) - 10 и Тья (2018 г.) - 9 тыс.кл./л. На 144 станциях (51%) численность *Chlamydomonas* sp. не превышала 1 тыс.кл./л.

Также как и в весеннем фитопланктоне, было изучено осеннее распространение *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2. Наименьшую численность и редкую встречаемость имел *Peridinium* sp. (*euriceps*), численность не превышала 0,4 тыс. кл./л. В 2019 и 2020 гг. он не был обнаружен ни на одной из станций. Численность и встречаемость *Glenodinium* sp. 2 также были крайне низкими. Этот вид не был обнаружен в 2017 и 2018 гг. (Рис. 19). На большинстве станций его численность не превышала 1 тыс.кл./л. Наиболее массово *Glenodinium* sp. 2 был отмечен в 2019 г., при средней численности 2 тыс.кл./л и максимальной численности 11 тыс. кл./л на ст. Ольхонские Ворота.

*Glenodinium* sp. 1 встречался практически на всех станциях (Рис. 19). Максимальная численность 102 тыс.кл./л была зарегистрирована на ст. Нижнеангарск в 2021 г. Если сравнивать осеннее и весеннее распределение *Glenodinium* sp. 1, то можно увидеть, что средние значения его численности схожи (2,5 - 3,8 тыс.кл./л) в оба сезона, а величины стандартных отклонений и максимальные значения численности более высоки у весенней генерации (Рис. 20).

Группировка станций по численности *Glenodinium* sp. 1 за 2017-2022 гг. на основе метода UMAP не выявляет предрасположенности к формированию кластеров, свойственным местам с высокой и низкой антропогенной нагрузкой. Более того в единый кластер попали станции с разных котловин озера (Рис. 20Б).

Таким образом, на основе видовой состава сообществ осеннего фитопланктона нельзя достоверно разделить участки акватории по степени антропогенного воздействия на прибрежную зону Байкала.

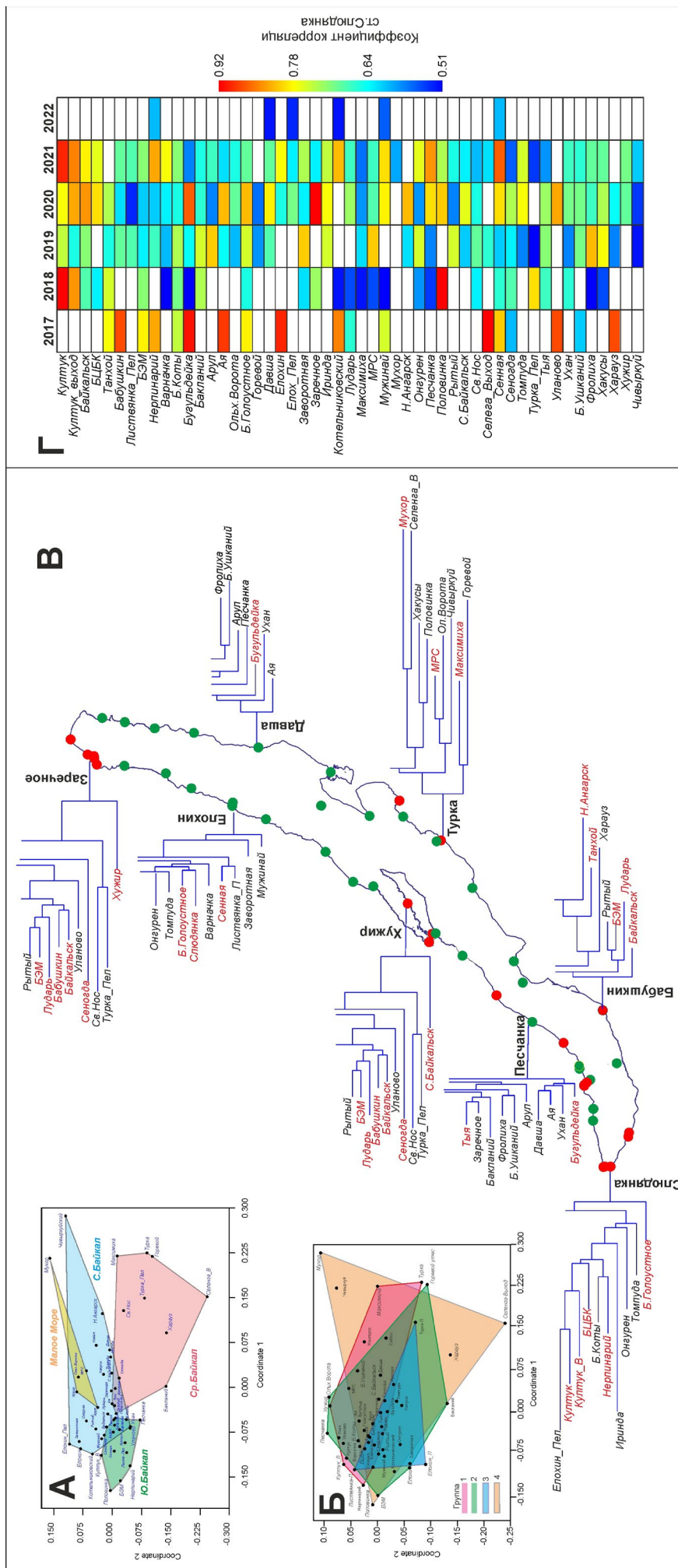
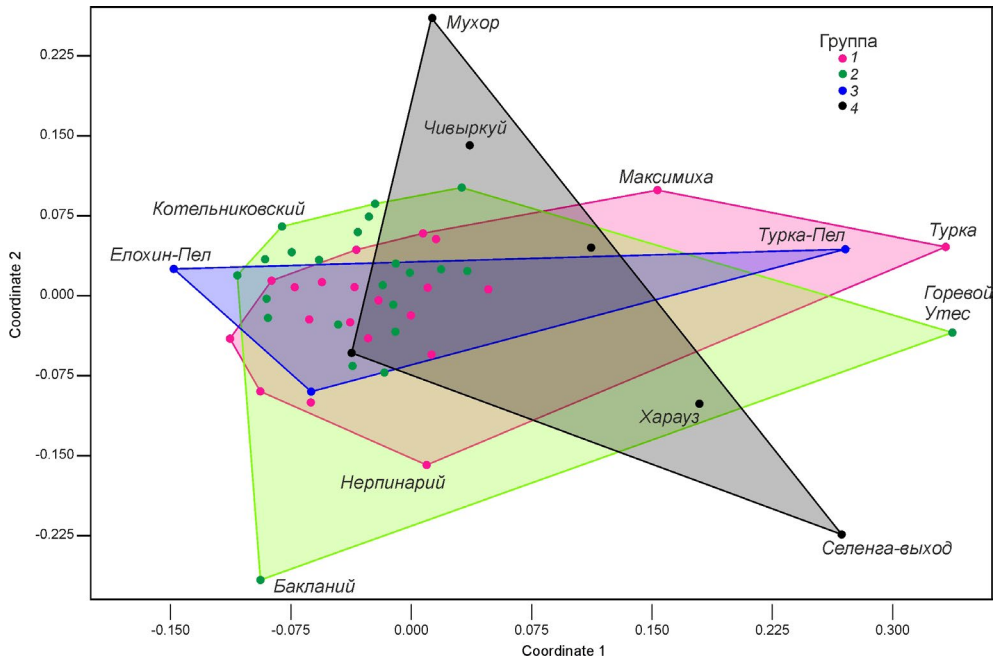


Рис. 17. А - разделение котловин озера (зеленое поле - Южная котловина, синие поле - Северная котловина, сиреневое - Центральная котловина) и пролива Малое Море (желтое поле) по видовому составу фитопланктона на основе метода непарметрического многомерного шкалирования pMDS. Б - разделение станций исходя из их групповой принадлежности. В - метод укорененного кластера, крупные надписи – станции от которых начинается строиться кластер, крупные надписи – станции от которых начинается строиться кластер. Г- станции, имеющие корреляцию со ст. Слюдянка при  $r > 0,5$  в межгодовом аспекте.





**Рис.18.** Распределение индикаторных видов осеннего фитопланктона исходя из групповой принадлежности станций (метод pMDS). 1, 2, 3 и 4 - группа станций.

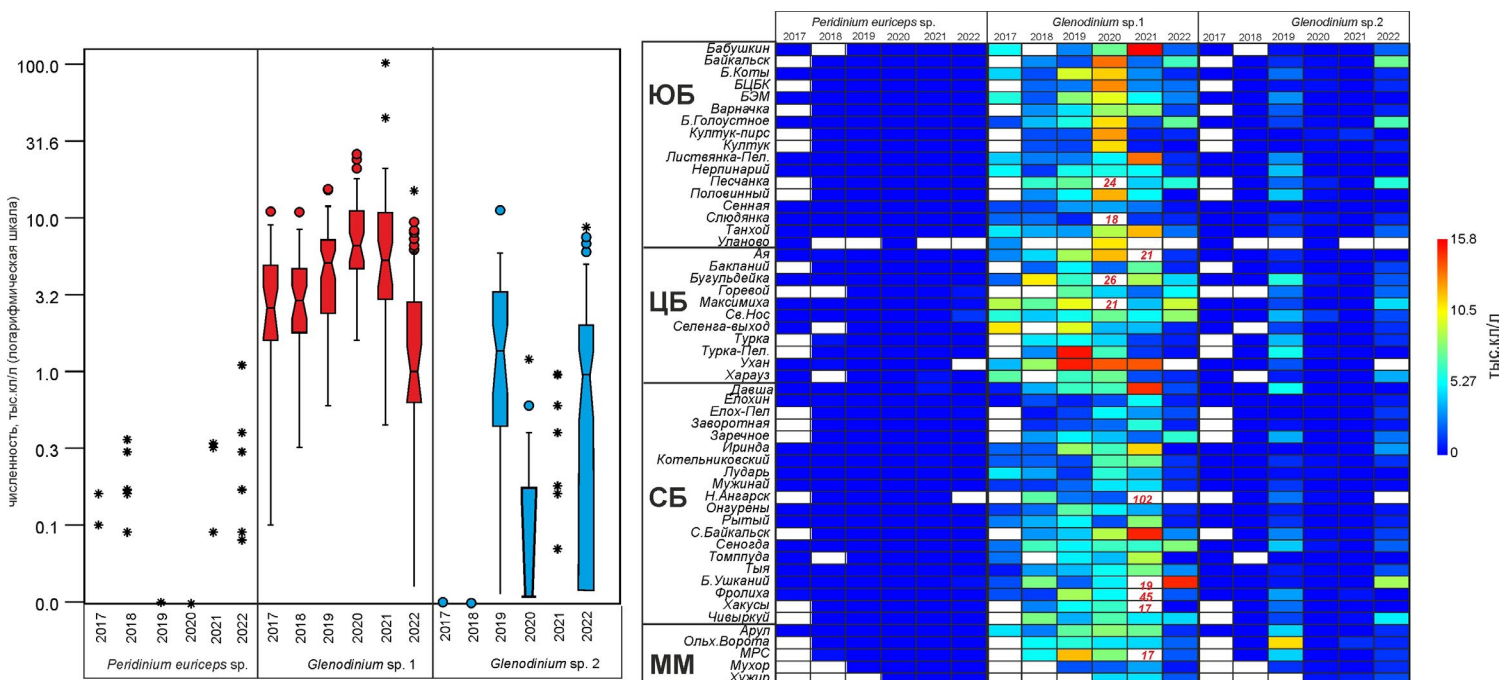
### 3.3. Сапробность

Оценка степени органического загрязнения воды была проведена по присутствию индикаторных видов фитопланктона - 93 вида (Таблица 4) в сезонном аспекте и с учетом групповой принадлежности станций. В наборе индикаторных видов доминируют (32%) бетамезосапробионты ( $\beta$ ,  $S = 2$ ). Доля олиго-альфамезосапробионтов ( $\alpha$ - $\alpha$ ,  $S = 1,8$ ), олиго-бетамезосапробионтов ( $\alpha$ - $\beta$ ,  $S = 1,4$ ) и олигосапробионтов ( $\alpha$ ,  $S = 1,0$ ) составляла 17, 16 и 11%, соответственно. Все остальные сапробиологические группы были менее 10% (Таблица 4).

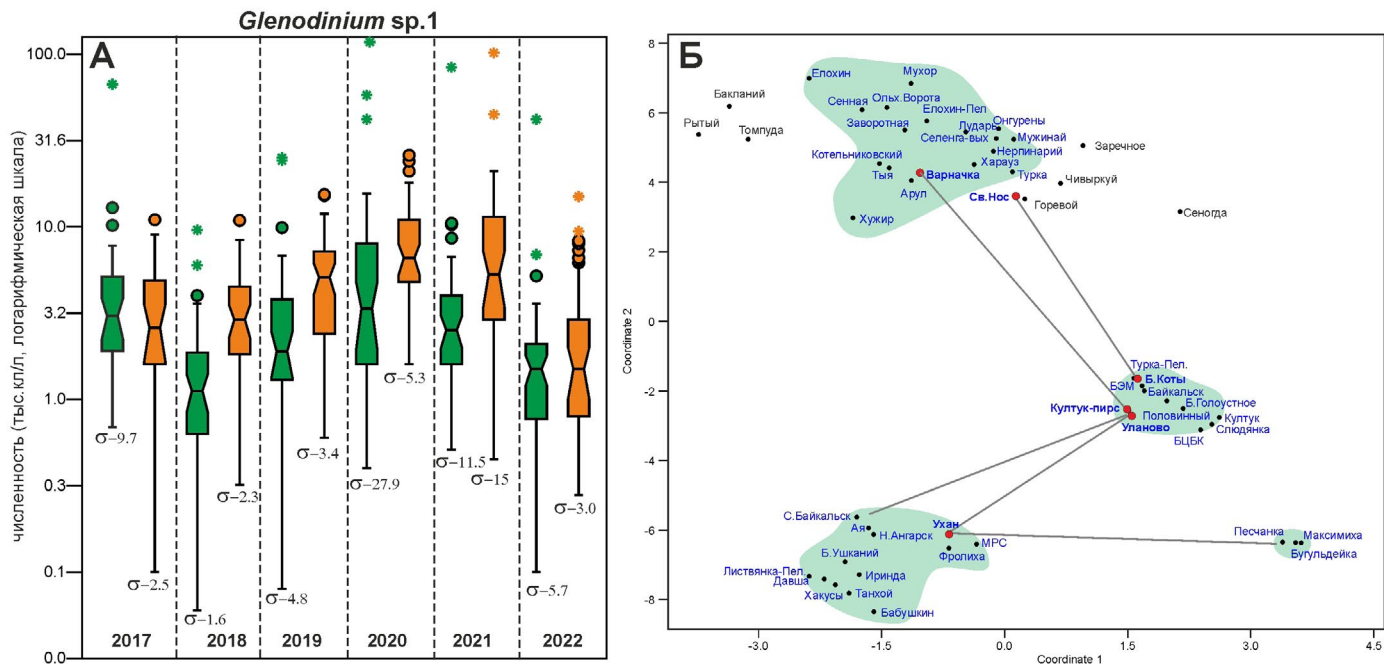
Диапазон колебаний значений сапробности составил: весной 1,46-1,69 (среднее-1,6), осе-

нью 1,58-1,68 (среднее-1,65) (Рис. 21). В большинстве случаев индексы сапробности соответствуют модели - *Limnosaprobity*,  $\beta$ -зоны самоочищения ( $S = 1,5-2,5$ ), и 3-му классу качества вод (умеренно загрязненные) согласно работам Sládeček (1973) и Barinova (2017).

Традиционно интерпретируется, что величины этого индекса соответствуют «концентрации органических веществ естественного (в основном, детритного) характера» и «концентрации растворенного кислорода». Однако, близкое соотношение индексов для таких разных групп станций и сезонов, вызывает сомнение в адекватности его применения для Байкала. Например, согласно концепции индекса сапробности следовало ожидать повышен-



**Рис.19.** Распределение численности *Peridinium* sp. (*euriceps*), *Glenodinium* sp. 1, sp. 2 в осеннем фитопланктоне. ЮБ – Южный Байкал, ЦБ – Центральный Байкал, СБ – Северный Байкал, ММ – Малое Море.



**Рис.20.** А - распределение численности *Glenodinium sp. 1* в весеннем (зеленые столбики) и осеннем (оранжевые столбики) фитопланктоне. Б - группировка станций по численности *Glenodinium sp. 1* за 2017-2022 гг. на основе метода UMAP (соседей 8, дистанция 0,2).

ные его значения у станций 4 группы, примыкающих к устьевым зонам рек или расположенных в заливах. Однако, значения индекса сапробности для этих станций были ниже, чем для станций 1 и 2 групп. Станции Южного Байкала, расположенные рядом с населенными пунктами, например, Листвянка, Слюдянка, Култук, Танхой выглядят согласно этому индексу благополучнее, чем станции второй группы с минимальной антропогенной нагрузкой. Так же и на Северном Байкале, станция Заречная с самым аномальным развитием спиригиры на Байкале, выглядит лучше, чем станции Фролиха, Елохин из второй группы.

В случае с весенним фитопланктоном индекс сапробности увеличивался за счет *Ch. parva*, *D. cylindricum*, *K. longiseta* и *M. arcuatum*, имеющих индекс сапробности 2. В осеннем фитопланктоне индекс сапробности увеличивался только за счет одного вида – *C. parva* ( $S = 2.0$ ).

Всего несколько видов, массово развивающихся в Байкале, придают ему статус 3-го класса качества вод (умеренно загрязненные). При этом следует задаться вопросом - если эти виды-маркеры «загрязнения» присутствуют не только в прибрежной части озера, но и в пелагиали, то значит пелагиаль озера является умеренно загрязненной?

Водоросли рода *Dinobryon* - показатели олиготрофных условий, предпочитающие водоемы с минимальным содержанием минерального фосфора, типичные для глубоководных северных озер (Бондаренко и Логачева, 2016). *D. cylindricum* является типичным представителем пелагиали озера с общей долей 2-18% в сообществе фитопланктона (Поповская и др., 2015). В весеннем фитопланктоне на станциях 1-й группы его средняя численность 40 тыс.кл./л, а на станциях 3-й группы 70 тыс.кл./л (Таблица 2). Так неужели станции 1 группы, обога-

щенные «загрязненными» водами, могли спродуцировать такое количество *D. cylindricum* для пелагиали озера? Учитывая, что на станциях 2 и 4-й групп среднее его содержание 99 и 87 тыс.кл./л, соответственно, нет оснований полагать, что этот вид является показателем умеренно загрязненных вод.

Регистрируемая в 2017-2022 гг. численность *Ch. parva* как в весенней, так и осенний периоды не более 5 млн.кл./л и не превышала численность этого вида, регистрируемую на станции Б. Коты в 1980-2000 гг. (Izmet'seva et al., 2011). Дополнительно, в 1980-2000 гг. численность этого вида оставалась примерно стабильной. На станции Листвянка БЭМ весной и осенью в 2017-2022 гг. содержание *Ch. parva* не превышало 58 и 482 тыс.кл./л, соответственно. Однако в 1990-1995 гг. на этой же станции ее содержание доходило до 6439 тыс.кл./л. (Vorobyeva, 2018). Таким образом, за последние 40 лет *Ch. parva* является типичным представителем фитопланктона Байкала, хотя в этот период происходили существенные изменения интенсивности антропогенного воздействия. Таким образом, мы не можем говорить, что использование индекса сапробности дает адекватную оценку качества вод оз. Байкал.

### 3.4. Влияние водности притоков на фитопланктон литорали озера

Показателем низкой водности притока в озеро является уровень Байкала. Сезонные колебания уровня Байкала характеризуются тем, что минимальный уровень озера приходится на конец апреля-начало мая, а максимальный на сентябрь-октябрь. В нашем случае можно видеть, что экстремально низкие уровни озера как весной, так и осе-

нью были в 2016 и 2017 гг. и весной 2018 г. (Рис. 1). С летнего периода 2018 г. и до конца 2023 г. сезонные колебания были близки к среднеголетним (Sinyukovich et al., 2024). Однако, осенний уровень Байкала в 2021 г. 457,22 м был максимальным за 2010-2022 гг. Таким образом, мы имеем несколько рефератных периодов сравнения: 2017 и весна 2018 г. – экстремально низкая водность притоков, 2021 г. – экстремально высокая водность, 2019, 2020 и 2022 гг. – нормальная среднеголетняя водность.

После разрушения ледового покрова на ширину зоны смешивания озерных и речных вод оказывает влияние ветровое перемешивание и граница термобара, оказывающего блокирующее действие на проникновение речных вод в глубь озера (Tomberg et al., 2019; Томберг и др., 2024). В распределении весеннего фитопланктона отчетливо выделяются кластеры станций 2017, 2020, 2021 и 2022 годов, и кластер, названный «единым», состоящим из станций всех годов наблюдения, то есть станций, слабо разделяющих между собой в межгодовом аспекте (Рис. 22). Кластер маловодного 2017 г. включает станций: Ая, Нижнеангарск, Арул, Бакланий, Бугульдейка, Давша, Елох\_пел, Елохин, Заречное, Ирinda, Котельниковский, Лударь, Максимиха, МРС, Мужинай, Ольхонские-ворота, Мужинай, Онгурены, Рытый, Северобайкальск, Селенга\_выход, Сеногда, Томпуда, Турка, Турка-пел., Тья, Б. Ушканий, Хакусы, Хужир и Чивыркуй. Этот кластер характеризуются не высокими биомассами – в среднем 600 мг/м<sup>3</sup> и средней видовой численностью - 18 видов (Рис. 22). Это выглядит несколько курьезно, что станции, непосредственно примыкающие к крупным притокам Байкала (р. В. Ангара, Турка, Рель, Томпуда, Тья, Бугульдейка и т.д), не показали высоких значений биомассы фитопланктона. В то время как станции 2017 г., вошедшие в единый кластер (Сенная, Заворотная, БЭМ, Б. Голоустное, Нерпинарий, Б. Коты, Мухор, Култук, Слюдянка, Култук\_пирс, Харауз, Танхой, Бабушкин, БЦБК, Байкальск) имеют бедный видовой состав - в среднем 12 видов, но высокие биомассы до 1500 мг/м<sup>3</sup>. Основные отличия между кластером 2017 г. и «единым» кластером заключаются в численности *D. cylindricum*, *Ch. parva*, *R. pusilla*, *N. graciliformis*, *K. longiseta* и *S. acus* subsp. *radians*. Также *S. acus* subsp. *radians* отмечена с повышенной биомассой на станциях 2017 г. «единого» кластера (Рис. 22). Таким образом в 2017 году 32 станции имели видовые особенности, характерные для этого периода, а 15 станций ничем не отличались от станций других периодов.

В период экстремальной водности в 2021 г., 42 станции вошли в отдельный кластер, а 9 станций были отнесены к «единому» кластеру (БЭМ, Култук, Ливствянка\_пелагиаль, Н.Ангарск, Половинный, Селенга-выход, Сенная, Слюдянка, Уланово). В среднем на станциях кластера 2021 г. регистрировали 22 вида, а биомасса доходила до 1700 мг/м<sup>3</sup> (Рис. 22). На станциях 2021 г., отнесенных к «единому» кластеру биомасса была ниже, чем на станциях этого же кластера в 2017 г. Станции кластера

2021 г. отличаются от станций 2021 г., отнесенных к «единому» кластеру, тем что не имеют индикаторных видов, несмотря на более высокое таксономическое разнообразие. Основные различия (53%) определяются повышенным присутствием в кластере 2021 г. – *M. arcuatum*, *A. islandica*, *St. meyeri*, *D. cylindricum*, *Ch. parva*, *S. acus* subsp. *radians*.

Станции 2018 и 2019 гг. не имели отличительных особенностей и все вошли в «единый» кластер. Восемь станций Южного Байкала (Бабушкин, Танхой, Байкальск, БЦБК, Слюдянка, Култук, Култук-выход, Половинный) в 2020 г. также образовали отдельный кластер. И этот кластер обусловлен повышенной численностью *A. baicalensis*, *A. islandica*, *S. acus* subsp. *radians*. Все остальные станции 2020 г. относились к «единому» кластеру. Станции 2022 г. также образовали отдельный кластер, с тесными связями между отдельными станциями Северного Байкала и Малого моря (Горевой утес, Св. Нос, Ая, Давша, Заречное, Лударь, МРС, Ольхонские – ворота, Сев.Байкальск, Сеногда, Тья, Фролиха, Хакусы).

Описанная выше картина кластеризации не позволяет уверенно говорить, что весенний фитопланктон имеет однозначный отклик на режим водности. Если начало развития фитопланктона приходится на подледный период, то и многие притоки озера находятся в замершем состоянии с минимальным подрусловым стоком у крупных рек (Селенга, В. Ангара, Баргузин, Турка, Тья) или же его полным отсутствием у мелких притоков. Чаще всего диапазон колебания минимального уровня от года к году составляет 20 см, и это также не может быть ключевым фактором, определяющим развитие весеннего фитопланктона. Показательны результаты по 2018 г. Весне 2018 г. предшествовали маловодные годы 2014-2017 гг. и казалось бы система должна испытать недостаток в притоке биогенных компонентов к 2018 году. Однако, все станции 2018 года полностью находятся в «едином» кластере, не указывая на какие-то изменения в сообществах фитопланктона, вызванных предшествующим маловодным периодом. И наоборот, станции 2020 и 2022 гг. формируют отдельные кластеры, хотя предпосылок в виде предшествующих значительных колебаний водности не было.

Для осеннего фитопланктона отчетливо отделяется от других только кластер 2022 г., а кластеры 2017 и 2021 гг. близки к единому кластеру №1 (Рис. 22). При этом, единых кластеров, которые сочетают в себя станции различных годов уже два. Станции отдельного кластера 2017 г. (20 станций) отличается от других станций 2017 г. (Селенга-выход, Харауз, Танхой, Тья, Фролиха, Томпуда, Ирinda, Св.Нос) Нерпинарий, Бабушкин, Максимиха) повышенным присутствием *R. pusilla*, *Ch. parva*, *C. minuta*, *Oscillatoria* sp.

Станции кластера 2021 г. (37 станций) отличаются от других станций 2021 г. (Танхой, Мухор, Горевой утес, Бакланий, Св.Нос, Харауз, Турка-пел, Турка, Максимиха, Давша, Томпуда, Хакусы, Фролиха, Чивыркуй, Ирinda) численными значени-

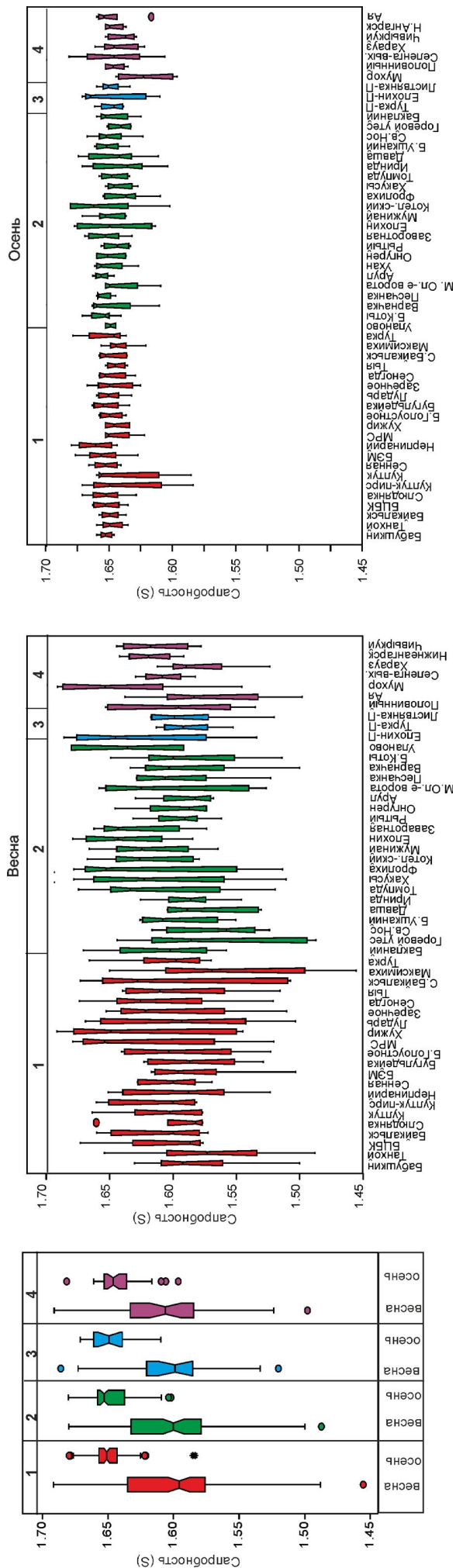


Рис.21. Распределение индекса сапробности весеннего и осеннего фитопланктона.

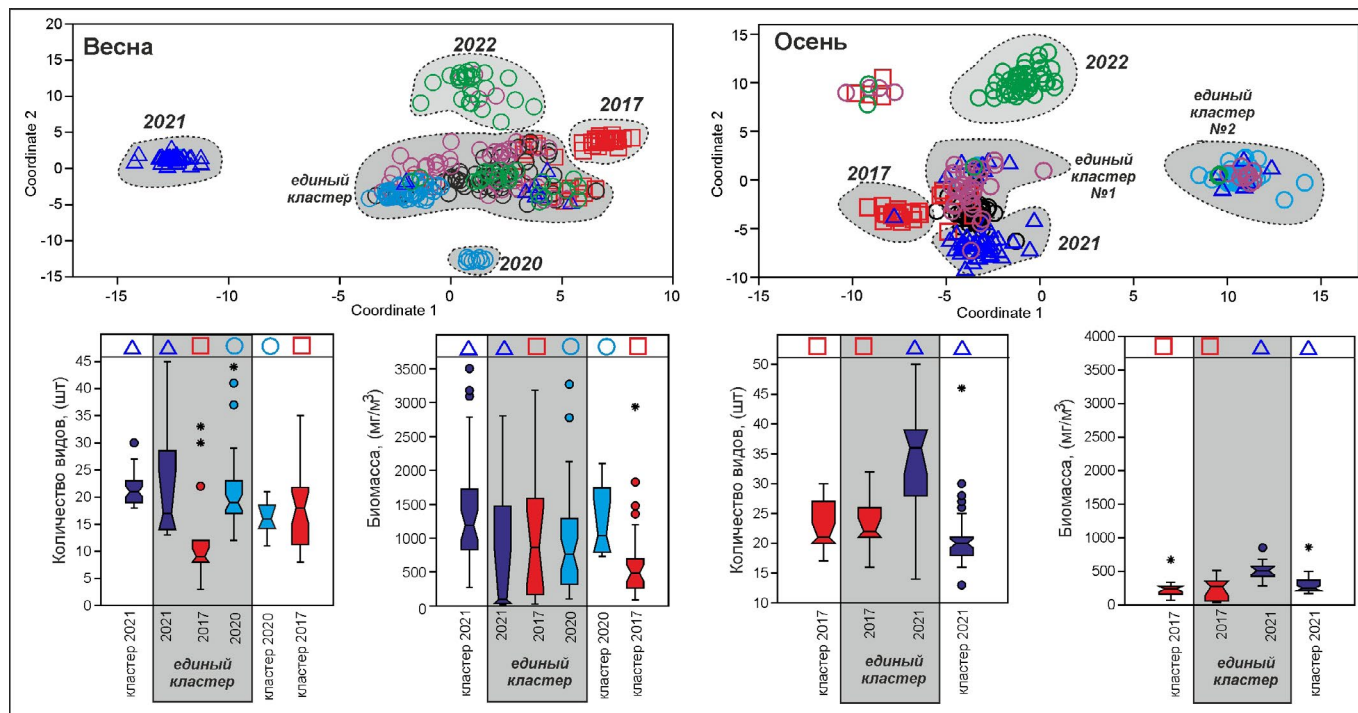


Таблица 4. Виды-индикаторы сапробности

Индикаторный вид	S индекс сапробности вида	Сапро-биологическая группа	Индикаторный вид	S индекс сапробности вида	Сапро-биологическая группа
<i>Aulacoseira baicalensis</i>	0.4	χ-ο	<i>Scenedesmus arcuatus</i>	1.8	ο-α
<i>Chrysophaerella baicalensis</i>	0.4		<i>Scenedesmus bijugatus</i>	1.8	
<i>Cyclotella baicalensis</i>	0.4		β	<i>Actinastrum hantzschii</i>	2
<i>Cyclotella minuta</i>	0.4			<i>Anabaena flos-aquae</i>	2
<i>Gymnodinium baicalense</i>	0.4			<i>Anabaena lemmermannii</i>	2
<i>Stephanodiscus meyeri</i>	0.4			<i>Anabaena macrospora</i>	2
<i>Peridinium baicalense</i>	0.4			<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	2
<i>Aulacoseira islandica</i>	0.6	ο-χ		<i>Chrysochromulina parva</i>	2
<i>Tabellaria flocculosa</i>	0.6			<i>Closterium moniliferum</i>	2
<i>Asterionella formosa</i>	1	ο		<i>Coelastrum microporum</i>	2
<i>Ceratium hirundinella</i>	1			<i>Cosmarium botrytis</i>	2
<i>Cryptomonas gracilis</i>	1			<i>Cryptomonas erosa</i>	2
<i>Cyclotella ocellata</i>	1			<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	2
<i>Dinobryon bavaricum</i>	1		<i>Dinobryon sociale</i>	2	
<i>Gloeocapsa turgida</i>	1		<i>Gomphosphaeria lacustris</i>	2	
<i>Gyrodinium helveticum</i>	1		<i>Koliella longiseta</i>	2	
<i>Synedra acus</i> subsp. <i>radians</i>	1		<i>Lagerheimia genevensis</i>	2	
<i>Synedra ulna</i> var. <i>danica</i>	1		<i>Monoraphidium arcuatum</i>	2	
<i>Urosolenia longiseta</i>	1		<i>Monoraphidium contortum</i>	2	
<i>Anabaena scheremetievi</i>	1.4		ο-β	<i>Phacus caudatus</i>	2
<i>Anabaena spiroides</i>	1.4			<i>Scenedesmus acuminatu</i>	2
<i>Cyclostephanos dubius</i>	1.4			<i>Sc. acuminatus</i> var. <i>biseriatus</i>	2
<i>Diatoma elongatum</i>	1.4			<i>Scenedesmus denticulatus</i>	2
<i>Dinobryon cylindricum</i>	1.4	<i>Scenedesmus obliquus</i>		2	
<i>Fragilaria capucina</i>	1.4	<i>Scenedesmus quadricauda</i>		2	
<i>Fragilaria crotonensis</i>	1.4	<i>Synedra acus</i>		2	
<i>Lynghya limnetica</i>	1.4	<i>Synedra ulna</i>		2	
<i>Merismopedia major</i>	1.4	<i>Synura petersenii</i>		2	
<i>Microcystis pulvereae</i>	1.4	<i>Tetraëdron incus</i>		2	
<i>Nitzschia graciliformis</i>	1.4	<i>Trachelomonas</i> sp. ( <i>volvocina</i> )		2	
<i>Pediastrum kawraiskyi</i>	1.4	<i>Trachelomonas hispida</i>		2	
<i>Rhodomonas pusilla</i>	1.4	<i>Volvox aureus</i>		2	
<i>Stephanodiscus makarovae</i>	1.4	β-α		<i>Aulacoseira granulata</i>	2.4
<i>Stephanodiscus minutulus</i>	1.4			<i>Closterium littorale</i>	2.4
				<i>Cryptomonas marssonii</i>	2.4
<i>Crucigenia quadrata</i>	1.6	β-ο		<i>Merismopedia tenuissima</i>	2.4
<i>Cryptomonas reflexa</i>	1.6		<i>Chlorella vulgaris</i>	3	
<i>Gloeotrichia pisum</i>	1.6		α		
<i>Oocystis lacustris</i>	1.6			<i>Melosira varians</i>	3.6
<i>Schroederia setigera</i>	1.6		α-β	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	3.6
<i>Sphaerocystis schroeteri</i>	1.6				
<i>Acanthoceras zachariadi</i>	1.8	ο-α			
<i>Closterium ehrenbergii</i>	1.8				
<i>Crucigenia tetrapedia</i>	1.8				
<i>Cryptomonas ovata</i>	1.8				
<i>Cryptomonas rostrata</i>	1.8				
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	1.8				
<i>Dinobryon divergens</i>	1.8				
<i>Elakotathrix genevensis</i>	1.8				
<i>Ellerbeckia teres</i>	1.8				
<i>Mallomonas vannigera</i>	1.8				
<i>Merismopedia glauca</i>	1.8				
<i>Pediastrum boryanum</i>	1.8				
<i>Pediastrum duplex</i>	1.8				
<i>Pediastrum tetras</i>	1.8				

Сапробиологическая группа	% видов
χ-ο	8
ο-χ	2
ο	11
ο-β	16
β-ο	6
ο-α	17
β	32
β-α	4
α	1
α-β	2
Σ	100



**Рис.22.** Кластеризация весеннего и осеннего фитопланктона исходя из года его формирования. Красные квадраты - станции 2017 г., черные круги - станции 2018 г., лиловые круги – станции 2019 г., синие круги – станции 2020 г., синие треугольники – 2021 г., зеленые круги – станции 2022 г.

ями *M. arcuatum* и *D. sociale*. А на станциях, отнесенных к «единым» кластерам №1 и №2, больший вклад в отличия вносят *M. pulverea*, *M. contortum*, *St. minutulus*, *A. formosa*, *C. gracilis*, *A. lemmermannii*, *A. granulate* и *N.graciliformis*.

Как не странно, но кластер 2021 г. по видовому составу беднее, чем кластеры 2017 г. Значения биомассы 2017 и 2021 гг. практически сопоставимы между собой, и меньше значений биомасс на станциях весеннего кластера 2017 г. (Рис. 22). Таким образом, и в осеннем фитопланктоне мы не находим отчетливых доказательств, взаимосвязи между водностью притоков и развитием фитопланктона. Также, мы не наблюдаем однозначной линейной связи в системе «чем больше приток биогенных компонентов за счет речного стока, тем больше биомасса фитопланктона». Так исследование распределения фитопланктона на Ангара-Кичерском мелководье Северного Байкала показало, что несмотря на высокие концентрации кремния, азота и фосфора на расстоянии до 8 км от устья р. В. Ангара фитопланктон развивался только в 1-1,5 км зоне от устья (Томберг и др., 2024). То есть экспансия фитопланктона в глубь озера была лимитирована, какими-то другими факторами, а не количеством биогенных компонентов.

Таблица 5 показывает, что по биомассе фитопланктона на станциях, близко расположенных к устьям рек, также не однозначно разделяют 2017 и 2021 гг. При этом станции Селенгинского мелководья показывают, диаметрально разное распределение биомасс. На большинстве станций, ничем не примечательных в гидрологическом плане, в 2020 г. отмечено увеличение биомассы фитопланктона и видового состава (Рис. 22).

Вероятнее всего, на снабжение фитопланктона биогенными элементами большее влияние оказывают внутренние гидрофизические процессы Байкала в виде апвеллингов – поступление глубинных вод в фотическую зону. Например, в ходе эксперимента на станции Б. Коты когда химический состав воды определялся каждый день с июня по ноябрь 2020 г. было определено, что с 3 июня по 17 июля содержание минерального фосфора с 9 мкг/л снизилось до нулевых значений, а 18 июля в результате шторма произошел апвеллинг и концентрация фосфора вновь стала около 9 мкг/л (Domysheva et al., 2023). В целом же за период открытой воды 2017-2022 гг. такие явления апвеллинга в мелководной зоне Южного и Среднего Байкала происходили через 4-6 дней, а в Северном Байкале 8-16 дней (Fedotov and Khanaev, 2023)

### 3.5. Сопоставление полученных данных с предыдущими исследованиями

В качестве сравнения мы выбрали данные 1990-1995 гг. для станции Листвянка БЭМ. В течение этого периода пробы фитопланктона отбирались каждые 5-7 дней. Были выбраны данные для нескольких дней, примерно, совпадающих со сроками проведения экспедиций 2017-2022гг. Если сравнивать общие биомассы фитопланктона планктона, то отчетливо видно, что в наших исследованиях биомасса весеннего фитопланктона не превышала 450 мг/м<sup>3</sup>, а в 1990 и 1995 гг. она доходила, до 600 и 1050 мг/м<sup>3</sup>, соответственно (Рис. 23). Практически все отделы весеннего фитопланктона 1990-1995 гг. по биомассам или были на уровне или превосходили таковые в 2017-2022 гг. Особенно,

Таблица 5. Биомасса осеннего фитопланктона на станциях, близко примыкающим к устьевым зонам притоков Байкала

год	Биомасса, (мг/м <sup>3</sup> )										
	Селенга-выход (р.Селенга)	Харауз (р. Селенга)	Н.Ангарск (В.Ангара)	Турка (р.Турка)	Томпуда (р.Томпуда)	Иринда (р.Иринда)	Бугульдейка (р.Бугульдейка)	Б.Голоустное (р.Голоустная)	Котельниковский (р.Куркула)	Тыя (р.Тыя)	Половинный (р.Половинная)
2017	321	281			65	38	309	241	249	42	
2018			283	491		47	279	203	84	182	97
2019	403	436	348	915	343	362	166	170	31	318	545
2020	4633	397	241	444	229	331	400	301	279	153	258
2021	419	510	860	676	281	344	331	208	210	500	232
2022	2491	140		59	95	145	121	158	38	185	1248

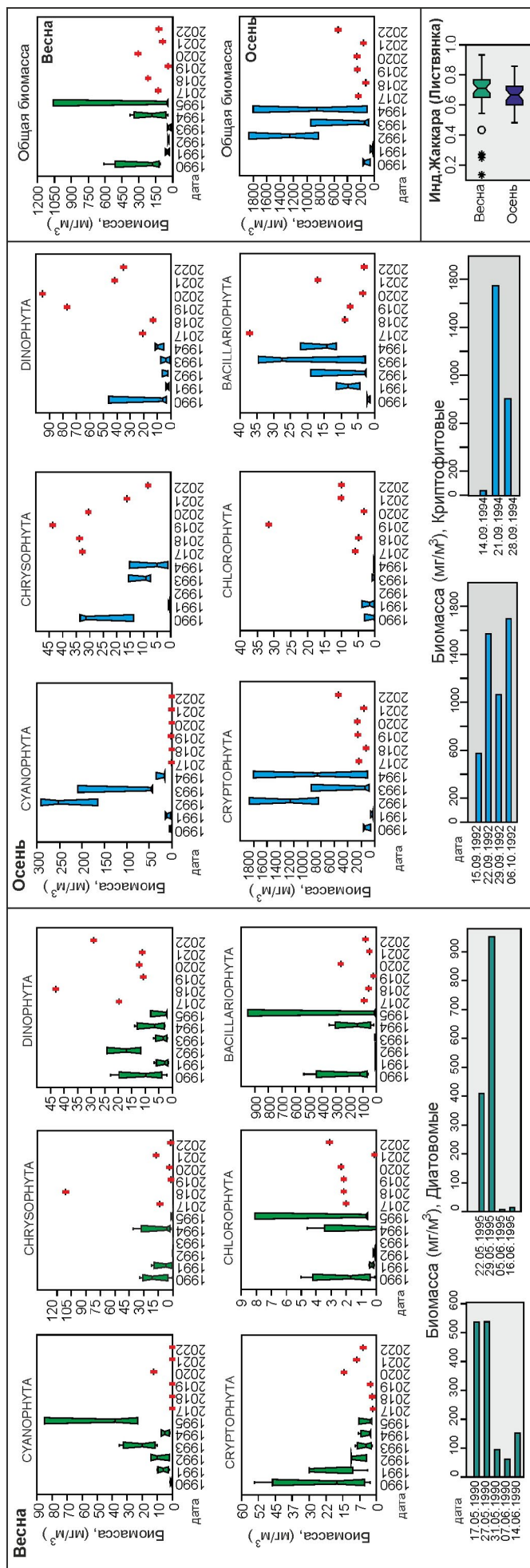


Рис.23. Сравнение распределений биомасс фитопланктона 1990-1995 и 2017-2022 годов. Нижние столбчатые диаграммы показывают декадную изменчивость биомасс доминантов весеннего (диатомовые) и осеннего (криптофитовые) фитопланктона.

это заметно для цианобактерий и криптофитовых водорослей (Рис. 23). Очень высокая изменчивость характерна и в декадном временном распределении. Например, если бы экспедиция отбирала пробы 29 мая 1995 г., то зарегистрировали бы биомассу диатомовых в - 950 мг/м<sup>3</sup>, а если бы 05 июня 1995 г., то их биомасса была бы только 7 мг/м<sup>3</sup> (Рис. 23). Вероятная причина этого явление - обновление верхней толщии глубинными водами при апвеллинге.

Биомассы осеннего фитопланктона 1992-1994 гг. в 3 и 4 раза превышали таковые периода 2017-2022 гг. (Рис. 23) Особенно удивительна биомасса криптофитовых, доходящая до 1752 мг/м<sup>3</sup>. Такие высокие суммарные биомассы вообще были редки в наших исследованиях, не говоря уже про криптофитовых, биомасса которых не превышала 450 мг/м<sup>3</sup> на четвертой группе станций (Рис. 13). Также совершенно неясным остается причина резкого увеличения биомассы, когда 14 сентября 1994 г. биомасса криптофитовых была 42 мг/м<sup>3</sup>, а 21 сентября 1994 г. увеличилась до 1752 мг/м<sup>3</sup>. Можно предположить, что наработки биомассы произошла из-за деления клеток и их увеличению по экспоненциальному уравнению. Однако, за этот промежуток времени биомасса других классов наоборот уменьшилась. С другой стороны, а какой источник питательного вещества для роста криптофитовых был в 1990-е годы в п. Листвянка? По интенсивности хозяйственно-бытовой деятельности в те годы поселок явно уступал современному периоду.

При исследовании процесса седиментации планктонных водорослей в прибрежной зоне оз. Байкал в районе пос. Б. Коты в июле 2002 г. было установлено, что интегральные значения фитопланктона в слое 0–15 м увеличились от 1,7 млрд/кл. м<sup>2</sup> 15 июля 2002 г. до 5,2 млрд/кл. м<sup>2</sup> к 22 июля 2002 г., то есть более чем в 3 раза (Крашук и Измествьева, 2004).

В районе п. Листвянка расположены 4 станции (БЭМ, Сенная, Нерпинарий, Листвянка-Пел). Была проверена схожесть видового состава (индекс Жаккара) на этих станциях для каждого года. В среднем эти станции имели индекс сходства для весенней и осенней съемки 0,7 и 0,62, соответственно. Однако, были и значения индекса и около 0,5, а весенний видовой состав 2017 года имел индекс сходства между станциями 0,13-0,4, то есть с отсутствием сходства (Рис. 23).

Таким образом, можно прийти к выводу, межгодовое сравнение количественных параметров фитопланктона по одной станции, может дать во многом ложный, не интерпретируемый результат.

#### 4. Выводы

В работе представлены данные по динамике изменения видового состава, численности клеток и биомассы прибрежного фитопланктона в весенний (конец мая-начало июня) и осенний (поздний сентябрь) периоды 2017-2022 гг. Станции исследования располагались по периметру озера через каж-

дые 30-50 км. Станции наблюдения разделялись на 4 группы: 1 - станции, примыкающие к населенным пунктам, 2 - без такого влияния, 3 -станции пелагиали и 4 - станции устьевых частей рек и заливы.

В весеннем фитопланктоне диатомовые были абсолютными доминантами (67,5%). Доля золотистых составляла (15%). Средняя биомасса диатомовых в 1, 2, 3 и 4 группах была 756, 561, 713 и 904 мг/м<sup>3</sup>, соответственно. Наиболее часто на станциях обнаруживали 15-22 вида. Наиболее высокие значения богатства видов - 40-45 видов было на станциях, расположенные вблизи дельты р. Селенга.

В осеннем фитопланктоне минимальное и максимальное количество обнаруженных видов на одной станции было 11 и 50, соответственно. С позиции численности осенний фитопланктон прибрежной зоны Байкала может быть характеризован, как сообщество гаптофитово-криптофитовых водорослей, а с позиции биомассы только как сообщество криптофитовых водорослей. Численность и биомасса криптофитовых водорослей могли достигать до 2235 тыс.кл./л и 472 мг/м<sup>3</sup>, соответственно. Золотистые водоросли при высокой численности, достигающей до 1000 тыс.кл./л, имели небольшую биомассу, зачастую ниже 50 мг/м<sup>3</sup>.

Установлено, что наиболее часто индекс сапробности для всех групп весной 1,46-1,69 (среднее-1,6), осенью 1,58-1,68 (среднее-1,65). Однако, только несколько видов, массово развивающихся в Байкале, придавали ему статус 3-го класса качества вод (умеренно загрязненные), что ставит под сомнение релевантность использования данного индекса для Байкала. Также не обнаружено отчетливых доказательств взаимосвязи между водностью притоков и развитием прибрежного фитопланктона.

На основе видового состава, численности клеток и биомассы весеннего и осеннего фитопланктона нам не удалось достоверно разделять части акватории прибрежной зоны Байкала по степени антропогенного воздействия на прибрежную зону Байкала.

#### Благодарности

Выражаем благодарность Аношко П.Н., Кузьмину А.В., Носовой В.В., Жученко Н.А., Голобоковой Л.П., Майор Т.Ю., Усову С.В., команде НИС «Папанин» за помощь в проведение экспедиционных работ. Бондаренко Н.А., Майор Т.Ю., Железняковой Т.О. за высказанные замечания, пожелания и помощь в оформлении статьи. Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 121032300224-8.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

Barinova S. 2017. On the classification of water quality from an ecological point of view. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources* 2: 1-8.



- Bondarenko N.A., Ozersky T., Obolkin L.A. et al. 2019. Recent changes in the spring microplankton of Lake Baikal, Russia. *Limnologia* 75: 19-29. DOI: [10.1016/j.limno.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.01.002)
- Bondarenko N.A., Vorobyova S.S., Zhuchenko N.A. et al. 2020. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 17-28. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.001)
- Domysheva V., Vorobyeva S., Golobokova L. et al. 2023. Assessment of the Current Trophic Status of the Southern Baikal Littoral Zone. *Water* 15(6): 1-14. DOI: [10.3390/w15061139](https://doi.org/10.3390/w15061139)
- Fedotov A.P., Khanaev I.V. 2023. Annual temperature regime of the shallow zone of Lake Baikal inferred from high-resolution data from temperature loggers. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 119-125. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-4-119](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-4-119)
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaentologia Electronica* 4(1): 9.
- Izmet'seva L.R., Silov E.A., Litchman E. 2011. Long-term dynamics of lake pelagic phytoplankton under climate change. *Inland Water Biology* 4(3): 301-307.
- Popovskaya G.I. 2000. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal. *Aquatic Ecosystem Health and Management* 3: 215-225.
- Sinyukovich V.N., Georgiadi A.G., Groisman P.Y. et al. 2024. The Variation in the Water Level of Lake Baikal and Its Relationship with the Inflow and Outflow. *Water* 16(560): 1-21. DOI: [10.3390/w16040560](https://doi.org/10.3390/w16040560)
- Sládeček V. 1973. System of water quality from the biological point of view. *Archiv für Hydrobiologie* 7: 1-218.
- Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sinyukovich V.N. et al. 2019. Low water level in the Selenga River and reduction of silica input to Lake Baikal. *Inland Waters* 9(4): 464-470. DOI: [10.1080/20442041.2019.1580078](https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1580078)
- Timoshkin O.A., Moore M.V., Kulikova N.N. et al. 2018. Groundwater contamination by sewage causes benthic algal outbreaks in the littoral zone of Lake Baikal (East Siberia). *Journal of Great Lakes Research* 44(2): 230-244. DOI: [10.1016/j.jglr.2018.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.01.008)
- Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research* 42: 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)
- Tomberg I.V., Sinyukovich V.N., Ivanov V.G. et al. 2019. Transformation of the chemical composition of waters from the Barguzin River in the Barguzin Bay (Lake Baikal). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 275-280. DOI: [10.31951/2658-3518-2019-A-4-275](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-4-275)
- Usoltseva M.V., Titova L.A., Firsova A.D. et al. 2023. Long-term dynamics of dominant diatom species abundance of spring phytoplankton in three basins of the pelagic zone of Lake Baikal in 1964-1984 and 2007-2016. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 55-62. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-2-55](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-2-55)
- Vorobyeva S.S. 2018. Phytoplankton assemblages of the Southern Baikal in 1990-1995 and 2016-2018. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 141-143. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-2-141](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-2-141)
- Антипова Н.Л., Кожов М.М. 1953. Материалы по сезонным и годовым колебаниям численности руководящих форм фитопланктона оз. Байкал. *Труды Иркутского университета. Серия Биология и экология* 7(1-2): 63-68.
- Антипова Н.Л. 1963. Сезонные и годовые изменения фитопланктона в озере Байкал. *Труды Лимнологического института СО АН СССР* 2 (22): 12-28.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio.
- Белых О.И., Бессудова А.Ю., Гладких А.С. и др. 2011. Руководство по определению биомассы видов планктона пелагиали оз. Байкал. Методическое пособие.
- Бондаренко Н.А., Логачева Н.Ф. 2016. Структурные изменения в фитопланктоне прибрежной зоны озера Байкал. *Гидробиологический журнал* 6: 17-26.
- Бондаренко Н.А., Русанов И.И., Черницына С.М. и др. 2020. Функционирование микроводорослей подледного планктона и ледовой интерстициали в прибрежной зоне озера Байкал. *Микробиология* 89(3): 344-355.
- Бондаренко Н.А., Русанов И.И., Черницына С.М. и др. 2022. Структура и продукционный потенциал летнего фитопланктона озера Байкал в современный период. *Водные ресурсы* 49(1): 66-76. DOI: [10.31857/S0321059622010059](https://doi.org/10.31857/S0321059622010059)
- Бриттон Г. 1986. Биохимия природных пигментов. Москва: Мир.
- Водоросли: справочник. 1989. В: Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. и др. (ред.). Киев: Наук. думка.
- Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И. 1975. Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука.
- Генкал С.И., Поповская Г.И., Бондаренко Н.А. 2006. Новые данные по морфологии, экологии и распространения *STEPHANODISCUS MEYERI* (BACILARIOPHYTA). *Ботанический журнал* 91(9): 1329-1334.
- ГОСТ 17.1.4.02-90. 1991. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а.
- Калюжная Л.И., Антипова Н.Л. 1974. О роли синедры в фитопланктоне озера Байкал. В: *Продуктивность Байкала и антропогенные изменения его природы*. Иркутск, С. 85 - 94.
- Кожова О.М., Мельник Н.Г. 1978. Инструкция по обработке проб планктона счетным методом. Иркутск: Издательство Иркутского университета.
- Кращук Л.С., Изметьева Л.Р. 2004. Седиментация фитопланктона в Южном Байкале в летний период. В: *Экосистемы и природные ресурсы горных стран*. Новосибирск, С. 87-93.
- Помазкина Г.В., Белых О.И., Домышева В.М. и др. 2010. Структура и динамика фитопланктона в Южном Байкале (Россия). *Альгология* 20(1): 56-72.
- Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В. 2011. Диатомовые водоросли планктона озера Байкал: Атлас - определитель. Новосибирск: Наука.
- Поповская Г.И., Усольцева М.В., Домышева В.М. и др. 2015. Весенний фитопланктон Байкала по данным кругобайкальских экспедиций 2007-2011 гг. *География и природные ресурсы* 3: 74-84.
- Поповская Г.И. 1977. Динамика фитопланктона пелагиали. В: *Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость*. Новосибирск, С. 5-39.
- Поповская Г.И. 1987. Фитопланктон глубочайшего озера мира. В: *Морской и пресноводный планктон*. Ленинград, С. 107-115.
- Поповская Г.И. 1991. Фитопланктон Байкала и его многолетние изменения (1958-1990). Новосибирск: АН СССР.СО. Центр. Сиб. Бот. сад.
- Поповская Г.И. 1963. Фитопланктон Селенгинского мелководья, прилегающих участков открытого Байкала, соров и дельтовых проток реки Селенги - Лиственичное на Байкале.
- Томберг И.В., Сороковикова Л.М., Синукович В.Н. и др. 2024. Формирование химического состава вод Северного Байкала в зоне смешения с водами притоков. *Метеорология и гидрология* 3: 1-13. DOI: [10.52002/0130-2906-2024-3-98-110](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-3-98-110)
- Яснитский В.Н., Скабичевский А.П. 1957. Фитопланктон Байкала. *Труды Байкальской лимнологической станции* 15: 212-262.