

Current state of the ecosystem of Lake Vedlozero and its biological resources (Republic of Karelia, northwestern Russia)

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Sidorova A.I.*, Syarki M.T., Slastina Yu.L.

Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2 Aleksander Nevsky Str. 50, Petrozavodsk, 185030, Russia

ABSTRACT. The results of a study of the current state of the ecosystem of Lake Vedlozero (Republic of Karelia, northwestern Russia) in 2021-2022 and its changes over 30 years are presented. In recent years, in the summer-autumn period, algal blooms, including toxic cyanobacteria, have intensified in the lake, which affects the quality of the water and fish habitat. Active algal blooms are still local and are observed mainly in areas of the lake with intense anthropogenic impact. In general, the Lake Vedlozero ecosystem at the present stage corresponds to mesotrophic status in terms of hydrochemical and hydrobiological indicators. The lake's aquatic communities have not undergone noticeable changes since the 90s of the last century. The concentration of chlorophyll *a* has increased by an order of magnitude (3 µg/l in 1992 and 11-90 µg/l in 2021). Planktonic communities are in a stable state and provide a stable food supply for planktivorous fish. The composition and structure of benthic communities also did not change over the 30-year period. To calculate fish productivity, an analysis of the distribution of organic matter and energy in the food web of the lake ecosystem was carried out using the balance model of V.V. Boulion. The results of the model calculation are in good agreement with empirical data. Thus, the model can be used for calculating fish production and estimating possible catches in the lake. According to the model, possible catches amount to a third of fish production and are equal to 9.6 kg/ha. For the first time in 2021, an alien species of the American rotifer *Kellicottia bostoniensis* was recorded in Lake Vedlozero, which may indicate that the range boundary of this species is moving northward against the backdrop of continuing warming of the regional climate in northwestern Russia.

Keywords: Lake Vedlozero, phytoplankton, zooplankton, macrozoobenthos, fish, catches, ecosystem modeling, alien species

For citation: Sidorova A.I., Syarki M.T., Slastina Yu.L. Current state of the ecosystem of Lake Vedlozero and its biological resources (Republic of Karelia, northwestern Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - P. 1-19. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-1-1

1. Introduction

In recent decades, there has been an increase in anthropogenic load on lakes, which, coupled with fluctuations in climatic factors, leads to changes in the living conditions of aquatic animals and plants, which entails changes in the useful biological resources of lakes (Dodds et al., 2009; Le et al., 2010; Moss et al., 2011; Schneider et al., 2014; Tsai et al., 2022; Xia et al., 2016; Qin et al., 2023; Zhang et al., 2023).

Climate change is affecting both small and large lakes around the world. A clear and rapid reaction of lakes to climate warming is an increase in the water temperature of the upper layer, where the most active development of phytoplankton occurs. Increases in surface water temperatures observed in the American

Great Lakes - Superior, Huron, Ontario (Austin and Colman, 2007; Dobiesz and Lester, 2009), in the lakes of Europe - Zurich, Geneva, Plußsee (Efremova et al., 2016). Positive trends in surface water temperature have been identified for Lake Baikal (Hampton et al., 2008; Izmet'eva et al., 2016), and the Rybinsk Reservoir (Litvinov and Zakonnova, 2012). Over the past two decades, in Karelian lakes Topozero, Rugozero, Vygozero, Segozero, Vodlozero, and Syamozero, an increase in average water surface temperatures from June to October has been noted (Efremova et al., 2016). The fragile ecosystems of small and medium-sized northern lakes are the most vulnerable to climate change, which requires an in-depth study of the changes in habitat and structure of aquatic communities.

*Corresponding author.

E-mail address: bolt-nastya@yandex.ru (A.I. Sidorova)

Received: July 09, 2024; **Accepted:** January 09, 2025;

Available online: February 26, 2025

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



Eutrophication due to nutrient loads and intensive fishing of valuable fish species change the structure of fish community, lead to significant shifts in fish stocks of lakes and changes in the level of biological resources (Schneider et al., 2014; Feng et al., 2023; Abo-Taleb et al., 2023).

The complex interactions of elements in the food web of a lake, which provide the food supply for fish, make it urgent to comprehensively study lake ecosystems, their production properties and the functioning conditions of plankton and benthos. The level of biological resources depends on the state of the entire ecosystem of the lake, therefore the assessment of fish stocks must take into account the state of its planktonic and benthic communities. Thus, an increase in phosphorus load leads to increased eutrophication in lakes. As a result, the productive properties of the lake change, the production of phyto-, zooplankton and benthos as the basic food resources increases, and as a result, the intensity of fish production and the volume of possible catches increase (Moss et al., 2011).

Lake Vedlozero is medium lake in the southern part of Karelia, which has fishing significance. There are certain difficulties for directly assessing the fish productivity of a lake, so it is relevant to obtain model estimates using food supply values, for example, plankton and benthos biomass, as well as other indicators.

To effectively manage fisheries and carry out measures to increase fish stocks, it is necessary to assess the current state of the lake's ichthyocenosis, its composition, structure and food supply.

The purpose of the work is to assess the current state of the aquatic ecosystem of Lake Vedlozero and its bioresource potential.

2. Materials and methods of research

Lake Vedlozero is located in the Republic of Karelia in the northwestern part of Russia. The climate regime of this territory is characterized as transitional from marine to continental. According to the classification of B.P. Alisov, the climate of Karelia belongs to the Atlantic-Arctic zone of the temperate zone. The predominance of air masses of Atlantic and Arctic origin led to long, relatively warm winters, late springs, short and cool summers. High air humidity, large amounts of precipitation and sharp variability of meteorological indicators are observed in all seasons of the year (Nazarova, 2014a).

In the 2000s, for the territory of Karelia, an increase in the average annual air temperature by 1–2°C and an increase in the annual amount of precipitation by 20–70 mm were noted compared to the base line (1961–1990). The most intense warming

was observed in winter. Over the past twenty years, the date of stable transition of air temperature through 0°C towards an increase occurs earlier by 5–7 days; the stable transition of average daily temperature through 10°C (the onset of the summer season in Karelia) earlier by 2–5 days; the date of transition through 0°C in the downward direction is observed later by 7–10 days. As a result, the duration of the summer season and the warm period has increased for the entire territory of Karelia (Climate..., 2004; Nazarova, 2014b).

Lake Vedlozero is located in the southern part of the Republic of Karelia. Its basin is of glacial origin. The morphometric characteristics of the lake are shown in Table 1.

Lake Vedlozero is a mesotrophic lake (Lakes..., 2013). Its catchment area is well developed economically (agriculture is developed). There is a high population density here. The lake is used for water supply, recreation, and recreational fishing. The current state of the ecosystem of Lake Vedlozero was formed as a result of the interaction of natural processes in the aquatic environment and in the lake's catchment area. The lake is under constant influence of anthropogenic pressure. The northeastern part of the lake, where the rural settlement of Vedlozero is located and where the Vokhtozerk River flows, experiences increased anthropogenic impact. Wastewater flows into the river from treatment plants. In the 70s of the last century, a dam was built in the northeastern region of the lake between the island and the shore of the lake. The dam dramatically changed the hydrological regime of this part of the lake. As a result, an artificially created bay appeared, shallow and stagnant (Sabylina and Efremova, 2022). In the summer of 2023, a hole was made in the dam, which significantly increased the circulation of water in the bay. The response of the plankton community to changing hydrological conditions in this part of the lake will need to be assessed in the coming years.

The chemical composition of Lake Vedlozero water is characterized by satisfactory quality (Sabylina and Efremova, 2022). The water is low-mineralized, pronounced hydrocarbonate class, calcium group. Based on the humus content, the amount of nutrients and the pH value, the lake is classified as meso-humus, eutrophic and neutral. The northeastern bay of the lake is experiencing heavy anthropogenic pressure. High content of nutrients, especially phosphorus, in the waters of the River Vokhtozerk indicates extremely unsatisfactory treatment of domestic wastewater. In the bay, which receives runoff from residential and point sources of pollution, the content of nutrients is the highest throughout the year. This causes the extremely unfavorable ecological state of this area of the lake, which is most in demand by the population in terms of

Table 1. Morphometric characteristics of the Lake Vedlozero (Lakes..., 2013).

Center coordinates	A.s.l., m	Catchment area, km ²	Lake surface area, km ²	Lake volume, million m ³	Depth, m	
					average	maximum
61°33' N 32°42' E	77	564	58	407	7	14.8

water use. In the summer-autumn period, the water of the bay is susceptible to algal blooms, including cyanobacteria, which release toxins dangerous to humans and animals.

Macrophytes vegetation is very poor (Lakes..., 2013).

To assess the current state of the lake's ecosystem, an analysis of the concentration of chlorophyll *a*, the indicators of summer phytoplankton, zooplankton and macrozoobenthos of some fish populations was carried out (based on published data and data obtained during the open water period 2021-2022).

Phytoplankton and chlorophyll *a* samples were taken in the surface layer of the bay (station 1) and the central part of the lake (station 3) in March, May, June, July and September 2021. Zooplankton and macrozoobenthos samples were taken in July 2021, as well as in July and September 2022 at the same stations and additionally near the confluence of the river (station 2) (Fig. 1). Selection and processing of phytoplankton samples was carried out in a Nageotte chamber with a volume of 0.02 cm³ accordance with accepted methods (Methodology..., 1975). The concentration of chlorophyll *a* was measured by the spectrophotometric method (SCOR-UNESCO, 1966). Zooplankton was sampled from the water column using a Judi net with pores of 100 µm at station 3. Benthic samples were collected with an Ekman-Burge dredge (capture area 0.023 m²), and laboratory processing of samples was carried out using standard methods (Proceedings..., 1999).

For the flora and fauna of planktonic and benthic communities, an analysis of species composition, biodiversity and structural indicators, as well as the dominance of indicator species, was carried out. Quantitative estimates of zooplankton abundance and biomass were recalculated per cubic meter and sq.m. in a water column.

To assess fish production, the balance model of V.V. Boulion was used (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017). This model reflects the most general patterns of distribution of organic matter and energy in the food web of a lake ecosystem. The dependencies were obtained by analyzing data on lakes in northern and eastern Europe, the Republic of Belarus and the European part of Russia and are expressed in regression correlation (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017). Initial data for the model of Lake Vedlozero: latitude – 61.5 °N, average depth – 7 m, maximum depth 14.8 m, total phosphorus – 24 µg/l, color – 76 degrees.

3. Results and Discussion

Phytoplankton. According to 1989 and 1992 data, the lake's phytoplankton included 92 taxa: Cyanophyta – 9, Chrysophyta – 9, Bacillariophyta –

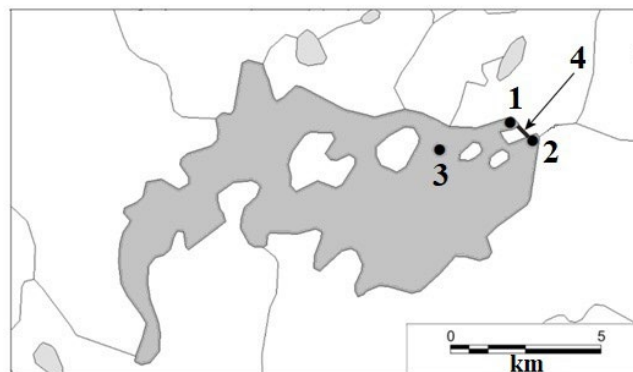


Fig.1. Sampling stations in the Lake Vedlozero in 2021 and 2022: St. 1 – northeastern bay; St. 2 – near the River Vokhtozerk; St. 3 – deep-water part of the lake between the islands. The arrow and number 4 schematically show the position of the dam.

44, Xanthophyta – 3, Cryptophyta – 3, Dinophyta – 3, Euglenophyta – 4, Chlorophyta – 17. Mass species were: *Aulacoseira granulate* (Ehr.) Sim., *Tabellaria fenestrata* (Lyng.) Kütz., *Cetratium hirundinella* (O.F.Müll) Duj., *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *Aphanizomenon flosaquae* (L.) Ralfs, *Aphanothece clatrata* W & G.S.West, *Gloeotrichia echinulata* P.G.Rich.. The abundance and biomass of phytoplankton were characterized by minimum values during the ice-covered period and an order of magnitude increase from May to July (Table 2). The average annual concentration of chlorophyll *a* in the lake in 1992 was 3.2 µg/l (Lakes..., 2013). Average annual production according to 1992-1993 data was 50 g C /m² year (Lakes..., 2013):

Phytoplankton in the surveyed areas of the lake during the open water period 2021 was characterized by low species richness. In terms of the number of species, diatoms and green algae predominated; a total of 104 species of algae of eight systematic groups were identified: Bacillariophyta – 42; Chlorophyta – 24; Cyanobacter – 20; Chrysophyta – 6; Dinophyta – 2; Euglenophyta – 5; Cryptophyta – 3, Xanthophyta – 2. The basis of the floristic complex (89% of the total list of all species) were representatives of diatoms, greens, cyanobacteria, and goldens. The data obtained in 2021 are comparable with the data of the previous research period, when the share of species of the four main divisions was 88% of the total list.

The leading group of diatoms in terms of species diversity is represented by the classes Centrophyceae and Pennatophyceae, which is typical for most water bodies of the Arctic and Subarctic (Getsen, 1985). The centric genus *Aulacoseira* (9) is more diverse, and the pennate genus is *Nitzschia* (6), *Navicula* (6), *Pinnularia* (4). Among the centric diatoms in the plankton of the lake, the most common species are *Aulacoseira granulate* A. *italica* (Ehr.) Sim., *A. islandica* subsp. *helvetica*

Table 2. Quantitative indicators of phytoplankton in Lake Vedlozero in 1989 and 1992.

Index	III 1989	III 1992	V 1989	V 1992	VII 1989	VII 1992
Abundance, thousand cells/l	28	19	252	277	2264	2308
Biomass, mg/l	0.07	0.07	0.52	0.31	7.40	7.93

(O.Mül.) Sim., *A. distans* (Ehr.) Sim., *A. distans* var. *alpigena* (Grun.) Sim., *A. ambigua* (Grun.) Sim., *Melosira varians* C.Agard., as well as several species from the genera *Stephanodiscus*, *Cyclotella*. The most common and widespread in the algal flora of Lake Vedlozero were pennate diatoms such as *Asterionella formosa* Has. and *Tabellaria fenestrata* (Lyng.) Kütz.

The second large division is green algae (24 taxa). From this group of algae, the taxonomically diverse order of green algae is Volvox, represented by species from the genera *Chlamydomonas*, *Pandorina*, *Eudorina*.

Of the cyanobacteria, the most diverse are the genera typical of the summer algal flora of the region: *Aphanizomenon*, *Dolichospermum* (Anabaena - 4 taxa), *Microcystis* (3), *Oscillatoria* (2), which cause "water blooms" in water bodies of the temperate zone. Golden algae are represented by species from the genera *Dinobryon*, *Mallomonas*, and small-celled algae from the genus *Kephyrion*. The diversity of euglenaceae is formed by representatives of the genera *Trachelomonas* (4 taxa) and *Euglena*. The share of participation of other departments Xanthophyta, Cryptophyta, Dinophyta in the formation of algal flora diversity is low.

Bay, st. 1. In March 2021, in the bay behind the dam (station 1), a predominance of cyanobacteria was observed, represented by *Dolichospermum flos-aquae* (Lyngb.) Breb., *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis wesenbergii* (Kom.) Starm. both in numbers and biomass. Diatoms, whose contribution to the creation of biomass was 39%, mainly belonged to the genus *Aulacoseira*, widespread in northern water bodies. Green algae are few in number, and their contribution to the creation of biomass is also small. The total number is up to 910 thousand cells/l, the total biomass is up to 0.12 mg/l.

In May 2021, the concentration of chlorophyll *a* was 35.6 µg/l. The dominant complex was formed by diatoms. The maximum contribution was made by *Aulacoseira italica* Kutz.Sim. var. *italica*, share in the total biomass is 53.9%, in the total number – 34.5%. *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim., which was also the dominant spring plankton in all studied areas of the lake, reached values of 0.977 mg/l, *Asterionella formosa* also reached its maximum development with a biomass of 0.250 mg/l. Green vegetated inactively, mainly due to representatives of the genus *Chlamydomonas*, up to 10% of the total number. In May, the values of abundance and biomass increased several times compared to the data for March 2021.

In June 2021, 28 species of phytoplankton belonging to 5 divisions were discovered in the bay, with a predominance of diatoms, mainly belonging to the genus *Aulacoseira*: *Aulacoseira distans* var. *alpigena*, *A. granulata*, *A. islandica* subsp. *helvetica*, *A. italica*, *A. subarctica* (O. Mull.) Haworth, *A. distans* both in numbers and biomass. Cyanobacteria, represented by the genus *Microcystis*, grew less actively in this part of the reservoir than in the spring. In addition to green algae, represented by *Monoraphidium contortum* (Thur.) Komark.-Legn., there are golden algae (*Dinobryon divergens* Imh.) and euglenophytes (*Trachelomonas volvocina* Ehr. Total number 1018 thousand cells/l, total biomass 0.731 mg /l.

In July 2021, the concentration of chlorophyll *a* was 90.8 µg/l. In the planktonic community, cyanobacteria dominated in abundance (97.5%) and biomass (72.1%) (Fig. 2). With a relatively small biomass (1.05 mg /l), the number reached 10,307 thousand cells/l due to the small volumes of cyanobacterial cells. During this period, *Dolichospermum flos-aquae* and *Dolichospermum spiroides* actively developed, together their share in the total abundance was up to 70%, in the total biomass up to 58%. *Microcystis aeruginosa* in numbers reached 15.6% of the total, while in biomass only up to 5.4%. The cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs., being the dominant species in the lake in the previous study period (Lakes..., 2013), was noted in this area of the lake in summer, its share in the total biomass up to 8% of the total, as well as *Snowella lacustris* (Chod.) Kom. et Hind (up to 9% of the population). Diatoms are also included in the complex of dominant biomass (up to 24%) due to the species *Aulacoseira distans* and *A. granulata*. In terms of abundance, the share of diatoms was 1.8%.

In September 2021, the concentration of chlorophyll *a* was 39.7 µg/l. The maximum values of phytoplankton abundance and biomass were observed in the autumn due to the massive development of green algae. Green volvox algae dominated (up to 76% of biomass, 84% of abundance), *Eudorina elegans* Ehr. and *Pandorina morum* (O.F.Mull) Bory. Diatoms accounted for 16% by

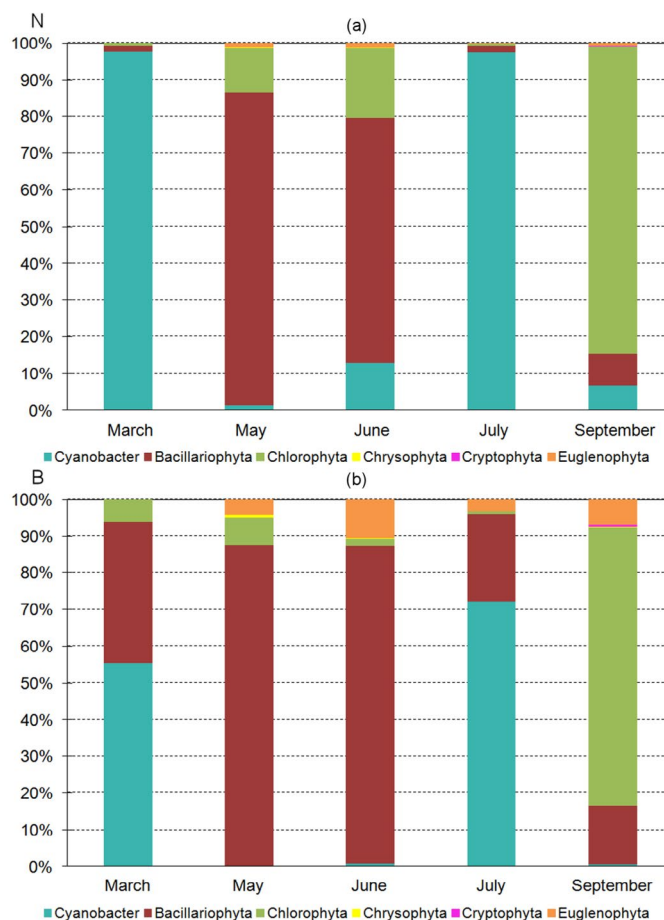


Fig.2. Dynamics of the ratio between the abundance (N, thousand cells/l) (a) and biomass (B, mg/l) (b) of algae of different systematic divisions (%) in the bay in different months of 2021.

biomass, 8.6% by abundance, cyanobacteria – less than 1% by biomass and 6.2% by abundance, euglenoids – 6.2% by biomass, less than 1% by abundance. The littoral zone of Lake Vedlozero is characterized as eutrophic with periods of polytropy during outbreaks of flowering in the summer and autumn according to the lake typification scales (Trifonova, 1990; Kitaev, 2007).

Center, st. 3. In the central deep-water part of the lake (station 3), the maximum development of phytoplankton occurred in the spring (Table 3). Diatoms were dominant in spring, and cyanobacteria in summer and autumn (Fig. 3).

In spring, in the center of the lake, diatoms accounted for 81% of the total number and 97% of the total biomass.

The maximum abundance (695 thousand cells/l, 44% of the total number) and biomass (5.534 mg/l, 81.6% of the total biomass) was recorded for *Melosira varians* (695 thousand cells/l, 5.534 mg/l). The dominant complex also included *Aulacoseira islandica* in abundance (up to 14% of the total abundance, 8.5% of the total biomass), and *Asterionella formosa* was noticeably vegetative (up to 8% of the total abundance, 1.2% of the total biomass). Green algae accounted for 14.7% of the total abundance, 1.1% of the total biomass; the maximum abundance was noted for *Stichococcus* sp. (11.5% of the total number). The abundance of cyanobacteria, golden algae, and euglena algae was 1.1, 1.9, and 1.3% of the total abundance. The biomass of cyanobacteria was extremely small, not exceeding a fraction of a percent of the total biomass; for golden and euglena algae it reached 0.5 and 1.2%, respectively.

In July 2021, in the center of the lake, the concentration of chlorophyll *a* was 35 µg/l. Cyanobacteria (89.9% of the total number, 68.2% of the total biomass), diatoms (4.4% of the total number, 28.7% of the total biomass), and green algae (5.5% of the total number, 2.7% of the total biomass) actively developed. The shares of golden, euglena algae and cryptophytes did not exceed fractions of a percent, both in number and in biomass. The dominant complex of algae is represented by species from the genus *Dolichospermum*, contributing to the formation of the total number up to 70%, and biomass up to 47%. The cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*, which was also among the dominants in the lake earlier (Lakes..., 2013), in the summer of 2021 had a share in the total biomass of up to 19%. Diatoms in the dominant summer plankton are represented by *Aulacoseira granulata* (16.5% of the total biomass, 0.4% of the total number).

In September 2021, the concentration of chlorophyll *a* in the center of the lake was 11.4 µg/l. The



Fig.3. Dynamics of the relationship between the abundance (N, thousand cells/l) (a) and biomass (B, mg/l) (b) of algae of different systematic divisions (%) in the central part of Lake Vedlozero in different seasons of 2021.

basis of the population of the autumn phytocenosis in the center of the lake was created by cyanobacteria (91.4%), now due to the development of *Microcystis aeruginosa*, its share in the total number is 86.6%, biomass – 18.5%. The number of diatoms reached 5.8%, greens – 2.5%, euglena – 0.3%. The biomass of autumn phytoplankton in this area of the lake was within the range of 1.890 mg/l; in addition to cyanobacteria (49.7%), its basis was formed by diatoms (37.3%), such species were actively developing as *Aulacoseira granulata*, *Aulacoseira italica*, *Tabellaria fenestrata*. The biomass of green algae reached 10%, euglena – 3.1%.

Compared with the dominant phytoplankton species in terms of abundance and biomass in 1989 and 1992, the dominant species of the 2021 growing season included diatoms *Aulacoseira italica*, *Asterionella formosa*, cyanobacteria *Dolichospermum flos-aquae*, *D. spiroides* and *Microcystis wesenbergii*, green algae *Eudorina elegans* and *Pandorina morum*. The previously

Table 3. Seasonal distribution of biomass (g/m³) and abundance (thousand cells/l) of phytoplankton in the Lake Vedlozero during the open water period 2021.

Station	Seasons					
	Spring (May)		Summer (July)		Autumn (September)	
	Abundance	Biomass	Abundance	Biomass	Abundance	Biomass
St. 1 (Bay)	3305	3.703	10569	1.456	45663	24.029
St. 3 (Center)	1560	6.781	21835	4.839	13575	1.890

dominant *Ceratium hirundinella* is found singly in the summer. In March 2021, the abundance of phytoplankton increased by an order of magnitude, the biomass increased insignificantly compared to the data for 1989 and 1992. This is explained by the dominance of small-celled cyanobacteria *Dolichospermum flos-aquae* and *Microcystis wesenbergii*. The obtained quantitative characteristics of the planktonic phytocenosis in the central part of the Lake Vedlozero characterizes it as mesotrophic, according to the lake typification scales (Trifonova, 1990; Kitaev, 2007).

Zooplankton.

During the period of our research in 2021, 40 species of zooplankton were identified in the pelagic zone of the lake (Copepoda – 9, Cladocera – 14, Rotaria – 17). The number of species in the summer ranged from 24 to 26 and averaged 25. For the first time, an alien species of the American rotifer *Kellicottia bostoniensis* was noted in the lake. It did not reach high abundance (0.3 th.ind/m³) and was observed only in the fall.

The species richness and structure of the zooplankton community of Lake Vedlozero, taking into account its natural and seasonal variability, is typical for lakes in this region of Karelia. The Shannon-Weaver index, reflecting the biodiversity, was relatively high: 3.4-3.6 for abundance and 2.8-3.3 for biomass, reflecting the health of the summer structure of zooplankton.

In summer, the zooplankton biomass was dominated by cladocerans (*Daphnia cristata* и *Bosmina longispina*), accounting for 45 to 60% of the total biomass. Small cyclops *Thermocyclops oithonoides* represented 10-15% of the biomass. The community structure and the ratio of the main zooplankton groups in July 2021 and 2022 were similar. Usually, more than 70-80% of the summer zooplankton biomass was represented by filter-feeding cladocerans and peaceful copepods. Predatory cladocerans and cyclops accounted for about 15%. In July 2022, a rare phenomenon in the samples was the mass development of the large predatory crustacean *Leptodora kindtii*, which accounted for up to 40% of the biomass. This caused a temporary change in the ratio of peaceful and predatory plankton (1:1.5). In autumn plankton, copepods *Eudiaptomus graciloides* and *Thermocyclops crassus* dominated in terms of numbers and biomass.

The summer biomass of pelagic zooplankton of 0.9-1.6 g/m³ characterizes the plankton system as mesotrophic, but close to the oligotrophic boundary (Table 4).

The transcontinental species of the American rotifer *K. bostoniensis* is currently actively expanding its habitat and spreading northward through the lakes of northwestern Russia, including Karelia (Syarki and

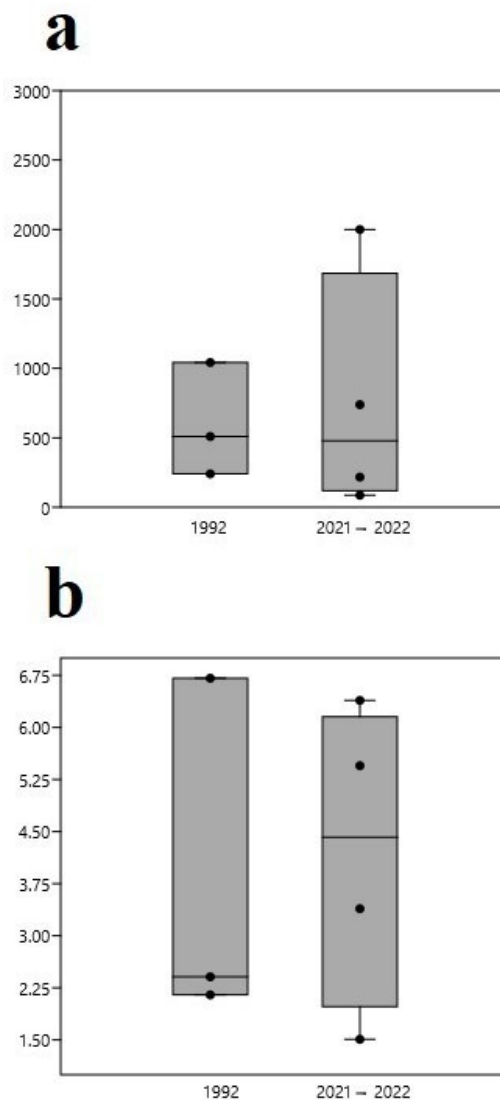


Fig.4. Dynamics of changes in the number (a, ind/m²) and biomass (b, g/m²) of macrozoobenthos of Lake Vedlozero in different years.

Zdorovenova, 2021; Syarki, 2019; Syarki et al., 2023). Since the native rotifer *K. longispina* is not a food item for fish, the appearance of a similar alien species will not have a significant impact on biological resources.

Macrozoobenthos. The data we obtained on the current state of macrozoobenthos indicates that in 2021-2022 the number of benthic organisms varied from 87 to 2000 ind./m², with biomass – 1.51-6.39 g/m².

Comparison of the literature data of 1992 and the results obtained in 2021 and 2022 did not show a decrease in the quantitative indicators of macrozoobenthos. Using the Mann-Whitney criterion, no significant

Table 4. The abundance and biomass of zooplankton in the Lake Vedlozero.

Date	Abundance, thousand individuals		Biomass, g	
	·m ⁻³	·m ⁻²	·m ⁻³	·m ⁻²
07.07.2022	46,7	373,7	0,88	7,01
13.07.2021	86,3	431,5	1,57	7,83
29.09.2021	24,1	180,6	0,81	6,04

change in the total number and biomass of zoobenthos was noted when comparing the two study periods (Fig. 4). Thus, the level of statistical significance is higher than the critical value of 0.05, $p = 0.86$ when comparing the number, and $p = 0.86$ when comparing the biomass.

The dominant complex is represented by larvae of chironomids Chironomidae and Oligochaeta. The quantitatively rich fauna of the bottom of the lake is not distinguished by a wide variety of species. In the zoobenthos of Lake Vedlozero, 6 systematic groups of invertebrates were noted, common to lakes of North-West Russia - chironomid larvae, oligochaete worms, mayfly larvae Ephemeroptera, bivalves Bivalvia and midge larvae Ceratopogonidae, as well as amphipods. A total of 13 taxa have been identified. Oligochaete worms are represented by two eurytopic species *Tubifex tubifex* (Müller, 1774) and *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862. In the shallow area of Lake Vedlozero, macrozoobenthos is represented by only one group of chironomids, Chironomidae (two genera *Chironomus* sp. and *Procladius* sp.). Ceratopogonidae larvae are rarely found throughout the lake.

The amphipod *Pallasiopsis quarispinosa* (Sars, 1867) is present in the deep-sea part of the reservoir. In the area of the confluence of the Vokhtozerkka River, bivalves of the genus *Pisidium* sp.

The obtained data confirms literary materials. Thus, according to literary sources (Lakes..., 2013), the bottom fauna in Lake Vedlozero consists mainly of insects. The average number is 325 ind./m², biomass is 1.9 g/m². Dominant complex: chironomids, oligochaetes.

Ichthyofauna. The following fish species were found in the ichthyofauna: vendace, pike, roach, bleak, bream, bluefish, burbot, perch, ruffe, pike perch, peled. Pike perch and peled are introduced, pike perch is a commercial fish, peled is rare. The main commercial fish are bream and perch (Alexandrov, 1957). The lake also contains sculpin goby, minnow, presumably whitefish, released into Vedlozero in 1949-1951, and grayling, but these are very rare fish. Rare fish include salmon and trout. Pike perch moved into the Lake Vedlozero in 1959 and 1964 (Sterligova and Ilmast, 2009; Sterligova et al., 2016; Sterligova et al., 2012). Positive results of the introduction of pike perch were noted by the authors in Vedlozero (Kudersky et al., 1990).

Model estimates of fish productivity

To calculate fish productivity, an analysis of the distribution of organic matter and energy in the food web of the lake ecosystem was carried out by using the balance model of V.V. Boulion (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017).

A comparison of model data with empirical data showed a fairly close agreement in terms of water transparency, primary production, and phyto- and zooplankton biomass. The model-estimated benthic biomass concentration were slightly higher than the measured values of these parameters (Table 5). Empirical data on the content of chlorophyll *a* are higher than model calculations. The distribution of plankton and benthos biomass in Lake Vedlozero corresponded to the basic ideas of functioning of the food web, which allows the model to be used for calculating fish production and assessing possible catches in the lake. Model calculations of the total fish production amounted to approximately 28 kg/ha for the season. Possible annual catches can be a third of ichthyoproducts and equal to 9.6 kg/ha.

The ecosystem of Lake Vedlozero provides a food supply for planktivores, benthivores and predators (Fig. 5).

For comparison with literary data (Lakes..., 2013), Table 5 shows the converted biomasses of links using standard coefficients from kcal to grams of wet weight.

4. Conclusions

As a result of the study and analysis, the current state of Lake Vedlozero was established based on sampling data in 2021 and 2022 compared to data from thirty years ago.

It has been shown that at the present stage, the lake's ecosystem corresponds to eutrophic state in terms of hydrochemical and hydrobiological indicators. The concentration of chlorophyll *a* has increased by an order of magnitude (from 3 µg/l in 1992 to 11-90 µg/l in 2021). In terms of the level of phytoplankton development, the littoral zone in the northeastern region of the lake, which is experiencing significant anthropogenic pressure, is characterized as eutrophic with periods of polytrophism during outbreaks of blooms. In the summer-autumn period there are episodes of intensive development of algae, including toxic cyanobacteria.

Table 5. Comparison of literature, empirical and model data on Lake Vedlozero.

Parameter	(Lakes of Karelia, 2013)	Empirical data	Model data
Transparency, m	1.7	1.2	1.6
Chlorophyll <i>a</i> , µg/l	3.2	23.2	5.9
Primary production, gC/m ² per year	50	-	49
Phytoplankton biomass, g/m ³	1.05-1.12	7.4-20.0*	2.5
Zooplankton biomass, g/m ³	1.5	1,0-1,7	1.3
Benthos biomass, g/m ²	4.9	4.5	6.1
Possible catches, kg/ha	12		9.6

Note: * – individual maximum phytoplankton indicators (our data 2021).

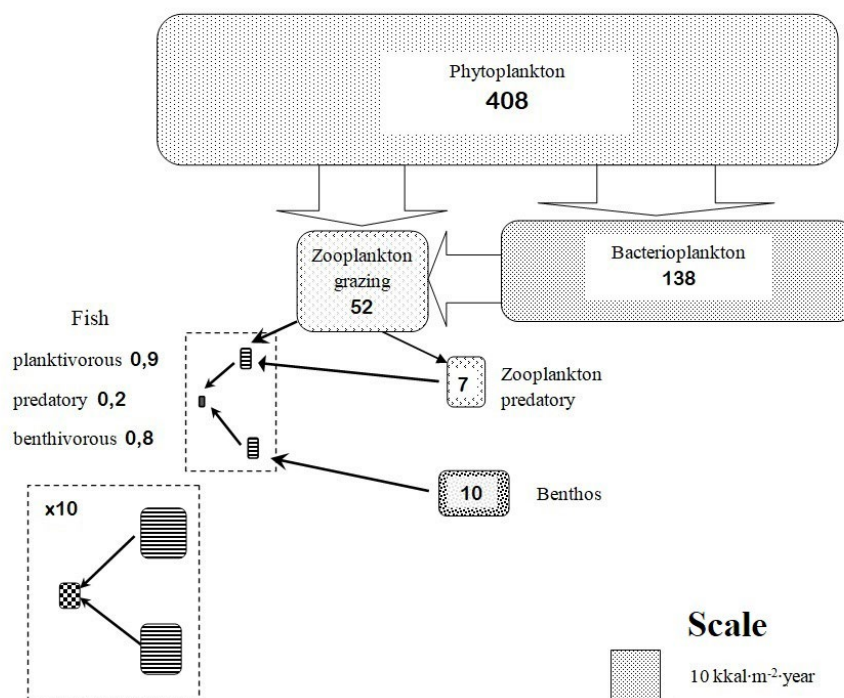


Fig.5. Annual production ($\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{year}$) of the main elements of the Lake Vedlozero ecosystem.

At the present stage, flowering outbreaks are local. A possible reason for their appearance is the synergistic influence of two factors: constant anthropogenic load and ongoing climate warming in the region. Also, the appearance in the lake of an alien species of the American rotifer *Kellicottia bostoniensis*, first notice in the lake in 2021, can be considered a consequence of the ongoing climate warming in northwestern Russia.

It is shown that aquatic communities have not undergone noticeable changes since the 90s of the last century. Planktonic communities are in a stable state and provide a stable food supply for planktivorous fish. The composition and structure of benthic communities has also not changed since the 90s of the last century. The fish fauna of Lake Vedlozero includes the following fish species: vendace, pike, roach, bleak, bream, bluegill, burbot, perch, ruffe, pike perch, and peled.

Analysis of the distribution of organic matter and energy in the food web of the lake ecosystem of the lake. Vedlozero using the balance model of V.V. Boulion showed that the results of the model calculation are in good agreement with the empirical data. Evaluations showed that possible catches (9.6 kg/ha) account for a third of fishproducts.

Acknowledgements

The authors sincerely thank for the work and initiative of writing the manuscript the senior researcher at the laboratory of hydrobiology the NWPI KarRC RAS Ph.D. A. P. Georgiev.

The study was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Northern Water Problems of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Abo-Taleb H.A., El-Tabakh M.A., Hendy D.M. 2023. Chapter 5 - Plankton and fish nutrition in African lakes. In: El-Sheekh M., Elsaied H.E. (Eds.), Lakes of Africa Microbial Diversity and Sustainability, pp. 139-172. DOI: [10.1016/B978-0-323-95527-0.00017-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95527-0.00017-8)
- Alexandrov T.N. 1957. Habitat conditions for fish in the Vedlozero Reservoir and measures for their reproduction. In: Kozhin N.I. (Ed.), Fisheries of Karelia. Karelian Research Institute. Petrozavodsk, pp. 135-142. (in Russian)
- Austin J.A., Colman S.M. 2007. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback. Geophysical research letters 34(6): 1-5. DOI: [10.1029/2006GL029021](https://doi.org/10.1029/2006GL029021)
- Boulion V.V. 2017. Two versions of a balance model to predict the bioproductivity of aquatic ecosystems. Water Resources 44: 820-830. DOI: [10.1134/S0097807817050025](https://doi.org/10.1134/S0097807817050025)
- Dobiesz N.E., Lester N.P. 2009. Changes in mid-summer water temperature and clarity across the Great Lakes between 1968 and 2002. Journal of Great Lakes Research 35(3): 371-384. DOI: [10.1016/j.jglr.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.05.002)
- Dodds W.K., Bouska W.W., Eitzmann J.L. et al. 2009. Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages. Environmental Sciences and Technology 43(1): 1-12. DOI: [10.1021/es801217q](https://doi.org/10.1021/es801217q)
- Efremova T.V., Palshin N.I., Belashev B.Z. 2016. Water temperature in different types of lakes in Karelia under changing climate based on data of instrumental measurements in 1953–2011. Water resources 43(2): 402-411. DOI: [10.1134/S0097807816020020](https://doi.org/10.1134/S0097807816020020)
- Feng K., Deng W., Zhang Y. et al. 2023. Eutrophication induces functional homogenization and traits filtering in Chinese lacustrine fish communities. Science of The Total Environment 857(3). DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.159651](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159651)

- Getzen M.V. 1985. Algae in the ecosystems of the Far North. Leningrad: Science. (in Russian)
- Häkanson L., Boulion V.V. 2002. The Lake Foodweb – modelling predation and abiotic/biotic interactions. Leiden: Backhuys Pablischers.
- Hampton S.E., Izmet'eva L.R., Moore M.V. et al. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14: 1947-1958. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)
- Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *Great Lakes Research* 42: 6-17. DOI: [10.1016/j.jglr.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006)
- Kitaev S.P. 2007. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Climate of Karelia: variability and impact on water bodies and watersheds. 2004. In: Filatov N.N. (Ed.). Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS. (in Russian)
- Kudersky L.A., Orlov Yu.I., Shimanovskaya L.N. 1990. Acclimatization of fish in inland waters. Fisheries, series "Aquaculture": Overview information. Moscow: VNIERKH. (in Russian)
- Le C., Zha Y., Li Y. et al. 2010. Eutrophication of Lake Waters in China: Cost, Causes, and Control. *Environmental Management* 45: 662-668. DOI: [10.1007/s00267-010-9440-3](https://doi.org/10.1007/s00267-010-9440-3)
- Litvinov A.S., Zakonnova A.V. 2012. Thermal regime of the Rybinsk Reservoir under global warming. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology] 9: 91-96. (in Russian)
- Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies. 1975. In: Mordecai-Boltovskiy F.D. (Ed.). Moscow: Science. (in Russian)
- Moss B., Kosten S., Meerhoff M. et al. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1(2): 101-105. DOI: [10.5268/IW-1.2.359](https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359)
- Nazarova L.E. 2014. Climate of the Republic of Karelia (Russia): air temperature, variability and changes. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov* [Geopolitics and ecogeodynamics of regions] 10(1): 746-749. (in Russian)
- Nazarova L.E. 2014. Variability of average long-term air temperature values in Karelia. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Proceedings of the Russian Geographical Society] 146(4): 27-33. (in Russian)
- Lakes of Karelia. Directory. 2013. In: Filatov N.N., Kuhareva V.I. (Eds.). Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS. (in Russian)
- Proceedings of a Workshop on monitoring of Large Lakes. 1999. Joensuu.
- Qin B., Zhang Y., Zhu G. et al. 2023. Eutrophication control of large shallow lakes in China. *Science of The Total Environment* 881: 163494. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.163494](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163494)
- Sabylina A.V., Efremova T.A. 2022. Changes in the chemical composition of the waters of Lake Vedlozero and its separate bay as a result of anthropogenic eutrophication. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences] 8: 20-30. DOI: [10.17076/eco1718](https://doi.org/10.17076/eco1718) (in Russian)
- Schneider S.C., Cara M., Eriksen T.E. et al. 2014. Eutrophication impacts littoral biota in Lake Ohrid while water phosphorus concentrations are low. *Limnologica* 44: 90-97. DOI: [10.1016/j.limno.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.09.002)
- SCOR-UNESCO Working Group № 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water. Monographs on Oceanographic Methodology, 1. Paris: UNESCO.
- Sterligova O.P., Ilmast N.V. 2009. Invasive species in aquatic ecosystems of Karelia. *Voprosy ihtologii* [Questions of ichthyology] 49(3): 372-379. (in Russian)
- Sterligova O.P., Ilmast N.V., Savosin D.S. 2016. Cyclostomes and freshwater fish of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS. (in Russian)
- Sterligova O.P., Ryukshiev A.A., Ilmast N.V. 2012. Results of fish farming work on the resettlement of Sander lucioperca in water bodies of Karelia. *Voprosy ihtologii* [Questions of ichthyology] 49(4): 558-560. (in Russian)
- Syarki M., Sidorova A., Georgiev A. et al. 2023. Biological resources of Lake Kroshnozero (North-West of Russia). *E3S Web of Conferences* 420: 09007. DOI: [10.1051/e3sconf/202342009007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342009007)
- Syarki M.T. 2019. The Invasion of the American Rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) into Vygozersky Reservoir (Republic of Karelia, Russia). *Russian Journal of Biological Invasions* 10: 382-386. DOI: [10.1134/S207511171904009X](https://doi.org/10.1134/S207511171904009X)
- Syarki M.T., Zdorovenova G.E. 2021. Species composition of zooplankton in Lake Vendyurskoye (Republic of Karelia) *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 8: 80-89.
- Trifonova I.S. 1990. Ecology and succession of lake phytoplankton. Leningrad: Nauka. (in Russian)
- Tsai C.W., Chiang C.-H., Shen S. 2022. Probabilistic eutrophication risk mapping in response to reservoir remediation. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 44: 101213. DOI: [10.1016/j.ejrh.2022.101213](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101213)
- Xia R., Zhang Y., Critto A. et al. 2016. The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. *Sustainability* 8(3): 229. DOI: [10.3390/su8030229](https://doi.org/10.3390/su8030229)
- Zhang C., McIntosh K.D., Sienkiewicz N. et al. 2023. Using cyanobacteria and other phytoplankton to assess trophic conditions: A qPCR-based, multi-year study in twelve large rivers across the United States. *Water Research* 235: 119679. DOI: [10.1016/j.watres.2023.119679](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119679)

Современное состояние экосистемы озера Ведлозеро и его биологических ресурсов (Республика Карелия, северо-запад России)

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Сидорова А.И.*, Сярки М.Т., Сластина Ю.Л.

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

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты исследования современного состояния экосистемы озера Ведлозеро (Республика Карелия, северо-запад России) по данным 2021 и 2022 гг. и ее изменения в сравнении с данными 30-летней давности. В последние годы в летне-осенний период в озере интенсифицируется цветение водорослей, в том числе, токсичных цианобактерий, что сказывается на качестве воды и состоянии рыбного сообщества. Активное цветение водорослей пока носит локальный характер и отмечается, главным образом, в районах озера с интенсивным антропогенным воздействием. В целом, экосистема Ведлозеро на современном этапе по гидрохимическим и гидробиологическим показателям соответствует мезотрофному статусу. Водные сообщества озера не претерпели заметных изменений с 90-х годов прошлого века. Планктонные сообщества находятся в стабильном состоянии и обеспечивают устойчивую кормовую базу рыб-планктофагов. Состав и структура бентосных сообществ также не изменилась за 30-летний период. Концентрация хлорофилла «а» увеличилась на порядок (от 3 мкг/л в 1992 г. до 11-90 мкг/л в 2021 г.). Для расчета рыбопродуктивности был проведен анализ распределения органического вещества и энергии в трофических сетях озерной экосистемы оз. Ведлозеро с использованием балансовой модели В.В.Бульона. Результаты модельного расчета неплохо соответствуют эмпирическим данным, что позволяет использовать модель для расчетов рыбопродукции и оценки возможных уловов в озере. Согласно модели, возможные уловы составляют треть от ихтиопродукции и равны 9.6 кг/га. Впервые в 2021 г. в озере Ведлозеро отмечен чужеродный вид американской коловратки *Kellicottia bostoniensis*, что может свидетельствовать о продвижении границы ареала этого вида на север на фоне продолжающегося потепления регионального климата северо-запада России.

Ключевые слова: Ведлозеро, фитопланктон, зоопланктон, макрозообентос, ихтиофауна, уловы, моделирование экосистемы, чужеродный вид

Для цитирования: Сидорова А.И., Сярки М.Т., Сластина Ю.Л. Современное состояние экосистемы озера Ведлозеро и его биологических ресурсов (Республика Карелия, северо-запад России) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 1. - С. 1-19. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-1-1](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-1-1)

1. Введение

В последние десятилетия отмечается рост антропогенной нагрузки на водоемы и колебания климатических факторов, в результате чего изменяются условия существования водных животных и растений, и полезные биоресурсы озер (Dodds et al., 2009; Le et al., 2010; Moss et al., 2011; Schneider et al., 2014; Tsai et al., 2022; Xia et al., 2016; Qin et al., 2023; Zhang et al., 2023). Особенно быстро экосистемные изменения происходят в небольших озерах.

Изменения климата влияют как на малые, так и на крупнейшие озера во всем мире. Явной

и быстрой реакцией озер на потепление климата является повышение температуры воды верхнего слоя, где происходит наиболее активное развитие фитопланктона. Увеличение температуры поверхности воды отмечено в Великих Американских озерах – Верхнем, Гурон, Онтарио (Austin and Colman, 2007; Dobiesz and Lester, 2009), в озерах Европы – Цюрих, Женева, Плюссзее (Ефремова и др., 2016). Положительные тренды температуры поверхностного слоя воды выявлены для Байкала (Hampton et al., 2008; Izmet'eva et al., 2016) и Рыбинского водохранилища (Литвинов и Законнова, 2012). За последние два десятилетия в следующих карель-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: bolt-nastya@yandex.ru (А.И. Сидорова)

Поступила: 09 июля 2024; **Принята:** 09 января 2025;

Опубликована online: 26 февраля 2025

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



ских озерах Топозеро, Ругозеро, Выгозеро, Сегозеро, Водлозеро, Сямозеро отмечено повышение усредненных с июня по октябрь значений температуры поверхности воды (Ефремова и др., 2016). Хрупкие экосистемы северных озер наиболее уязвимы в отношении климатических изменений, что требует углубленного изучения происходящих в них изменений среды обитания и структуры сообществ гидробионтов.

Процессы эвтрофирования из-за биогенной нагрузки различной природы и интенсивный лов ценных пород рыб изменяют структуру ихтиоценозов, приводят к значительным сдвигам в рыбных запасах озер и изменению уровня биоресурсов (Schneider et al., 2014; Feng et al., 2023; Abo-Taleb et al., 2023).

Сложные взаимодействия элементов в трофической сети водоема, обеспечивающие кормовую базу рыб, делают актуальным комплексное изучение водных экосистем, их продукционных свойств и функционирования планктона и бентоса. Уровень биологических ресурсов зависит от состояния всей экосистемы водоема, поэтому оценка рыбных запасов должна учитывать состояние ее планктонных и бентосных организмов. Так, увеличение фосфорной нагрузки приводит к усилению процессов эвтрофирования в озерах. В итоге изменяются продукционные свойства водоема, увеличивается продукция фито-, зоопланктона и бентоса, как основных кормовых объектов, и в результате этого растет интенсивность рыбопродукции и объем возможных уловов (Moss et al., 2011).

Озеро Ведлозеро является средним по размеру водоемом южной части Карелии, имеющим рыбопромысловое значение. Существуют определенные трудности для прямой оценки рыбопродуктивности водоема, поэтому актуальным является получение модельных оценок с использованием величин кормовой базы, например, биомасс планктона и бентоса, а также по иным показателям.

Для эффективного управления рыбным хозяйством и проведения мероприятий по увеличению рыбных запасов необходимо дать оценку современного состояния ихтиоценоза озера, его состава, структуры и кормовой базы.

Целью работы является оценка современного состояния водной экосистемы оз. Ведлозеро и его биоресурсного потенциала.

2. Материалы и методы исследования

Озеро Ведлозеро располагается в Республике Карелия в северо-западной части России. Климатический режим этой территории характеризуется как переходный от морского к континен-

тальному. По классификации Б. П. Алисова, климат Карелии относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения обусловили продолжительную относительно теплую зиму, позднюю весну, короткое и прохладное лето, высокую влажность воздуха, большое количество осадков и резкую изменчивость метеорологических показателей во все сезоны года (Назарова, 2014а).

В 2000-х гг. для территории Карелии отмечено повышение среднегодовой температуры воздуха на 1–2°C и увеличение годового количества атмосферных осадков на 20–70 мм по сравнению с климатической нормой (1961–1990 гг.). Зимой отмечено наиболее интенсивное потепление. За последние двадцать лет дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в сторону повышения происходит раньше на 5–7 дней, устойчивый переход среднесуточной температуры через 10°C (наступление летнего сезона в Карелии) раньше на 2–5 дней, дата перехода через 0°C в сторону понижения отмечается позже на 7–10 дней. В результате этого продолжительность летнего сезона и теплого периода года возросли для всей территории Карелии (Климат Карелии, 2004; Назарова, 2014б).

Ведлозеро расположено в южной части Республики Карелия. Котловина озера Ведлозеро ледникового происхождения. Морфометрические характеристики озера приведены в Таблице 1.

Озеро Ведлозеро – мезотрофный водоем (Озера..., 2013). Его водосбор хорошо освоен в хозяйственном отношении. Здесь высокая плотность населения, развито сельское хозяйство. Озеро используется для водоснабжения, рекреации, любительского рыбного промысла. Современное состояние экосистемы оз. Ведлозеро, сформировавшееся в результате взаимодействия природных процессов в водной среде и на водосборе озера, находится под постоянным влиянием антропогенной нагрузки. Повышенное антропогенное воздействие испытывает северо-восточный район озера, где располагается сельское поселение Ведлозеро и куда впадает р. Вохтозерка. В реку из очистных сооружений поступают сточные воды. В 70-е годы прошлого века в северо-восточном районе озера между островом и берегом озера была сооружена дамба, нарушившая естественный водообмен, что резко изменило гидрологический режим этого района озера. В результате этой постройки появился искусственно созданный залив, мелководный и непроточный (Сабылина и Ефремова, 2022). В летний период 2023 г. в дамбе было сделано отверстие, что заметно усилило циркуляцию воды в заливе. Реакцию планктонного сообщества на изменение гидрологических условий в этом районе озера предстоит оценить в ближайшие годы.

Таблица 1. Морфометрические характеристики оз. Ведлозеро (Озера..., 2013)

Координаты Центра	Абсолютная высота, м	Площадь водосбора, км ²	Площадь зер- кала озера, км ²	Объем озера, млн. м ³	Глубина, м	
					средняя	Макс.
61°33' с.ш., 32°42' в.д.	77	564	58	407	7	14.8

По химическому составу вод Ведлозеро, согласно литературным данным, характеризуется удовлетворительным качеством (Сабылина и Ефремова, 2022). Вода маломинерализованная, выраженного гидрокарбонатного класса, группы кальция. По величине гумусности, количеству биогенных элементов и величине pH озеро относят к мезогумусному, эвтрофному и нейтральному. Северо-восточный район озера испытывает большую антропогенную нагрузку. Высокое содержание биогенных элементов, особенно фосфора, в водах р. Вохтозерки свидетельствует о крайне неудовлетворительной очистке хозяйственно-бытовых сточных вод. В заливе, в который поступают стоки селитебных и точечных источников загрязнения, содержание биогенных элементов наиболее высокое в течение всего года, что обуславливает крайне неблагоприятное экологическое состояние этого района озера, наиболее востребованного населением с точки зрения водопользования. В летне-осенний период вода залива подвержена цветению водорослей, в том числе цианобактерий, которые в процессе жизнедеятельности выделяют опасные для человека и животных токсины.

Высшая водная растительность очень бедна (Озера..., 2013). Для оценки современного состояния экосистемы озера был проведен анализ концентраций хлорофилла «а», показателей летнего фитопланктона, зоопланктона и макрозообентоса некоторых популяций рыб (по литературным данным и данным, полученным в период открытой воды 2021-2022 гг.).

Пробы воды для определения хлорофилла а и фитопланктона отбирались в поверхностном слое (0.5 м) залива (ст. 1) и центральной части озера (ст. 3) в марте, мае, июне, июле и сентябре 2021 г., пробы зоопланктона и макрозообентоса – в июле 2021 г., а также в июле и сентябре 2022 г. на тех же станциях и дополнительно вблизи впадения реки (ст. 2) (Рис. 1). Отбор и камеральную обработку проб фитопланктона с использованием камеры Нажотта объемом 0.02 см³ осуществляли в соответствии с общепринятыми методами (Методика..., 1975). Концентрацию хлорофилла а измеряли спектрофотометрическим методом (SCOR-UNESCO, 1966). Пробы зоопланктона были получены интегральным обловом из столба воды сетью Джели с порами размером 100 мкм на станции 3. Пробы бентоса отбирали дночерпателем Экмана-Берджа (площадь захвата 0.023 м²), камеральная обработка проб производилась стандартными методами (Proceedings..., 1999).

Для флоры и фауны планктонных и бентосных сообществ был проведен анализ видового состава, биоразнообразия и структурных показателей, а также обзор доминирующих видов. Количественные

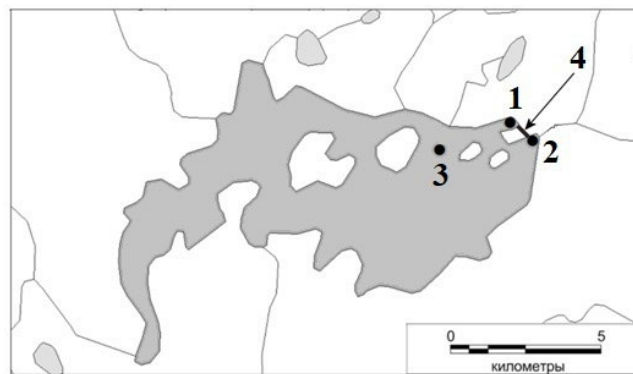


Рис.1. Станции отбора проб в оз. Ведлозеро в 2021 и 2022 гг.: ст. 1 – северо-восточный залив; ст. 2 – вблизи впадения р. Вохтозерки; ст. 3 – глубоководная часть озера между островами. Стрелкой и цифрой 4 схематично показано положение дамбы.

оценки численности и биомассы зоопланктона были пересчитаны на куб. м и кв. м. в столбе воды.

Для оценки рыбопродукции была использована балансовая модель В.В. Бульона (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017), которая отражает наиболее общие закономерности распределения органического вещества и энергии в трофических сетях озерной экосистемы. Закономерности получены при анализе данных по озерам северной и восточной Европы, Республики Беларусь и европейской части России и выражены в регрессионных зависимостях (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017). Начальные данные для модели озера Ведлозеро: широта – 61.5 °N, средняя глубина – 7 м, максимальная глубина 14.8 м, общий фосфор – 24 мкг/л, цветность – 76 град.

3. Результаты и обсуждение

Согласно данным 1989 и 1992 гг. **фитопланктон** озера включал 92 таксона: Cyanophyta – 9, Chrysophyta – 9, Bacillariophyta – 44, Xanthophyta – 3, Cryptophyta – 3, Dinophyta – 3, Euglenophyta – 4, Chlorophyta – 17. Массовые виды: *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim., *Tabellaria fenestrata* (Lyng.) Kütz., *Ceratium hirundinella* (O.F.Müll) Duj., *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz., *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs, *Aphanothece clathrata* W & G.S.West, *Gloeotrichia echinulata* P.G.Rich. Численность и биомасса фитопланктона характеризовались минимальными значениями в период ледостава и увеличением на порядок от мая к июлю (Таблица 2). Среднегодовая концентрация хлорофилла а в озере в 1992 г. по данным (Озера..., 2013) составляла 3,2 мкг/л; средняя годовая продукция по данным 1992-1993 гг. составляла 50 г С м² (Озера..., 2013).

Таблица 2. Количественные показатели фитопланктона оз. Ведлозеро в 1989 и 1992 гг.

Показатель	III 1989	III 1992	V 1989	V 1992	VII 1989	VII 1992
Численность, тыс.кл/л	28	19	252	277	2264	2308
Биомасса, мг/л	0.07	0.07	0.52	0.31	7.40	7.93

Фитопланктон обследованных районов озера в период открытой воды 2021 г. характеризовался невысоким видовым богатством. По числу видов преобладали диатомовые и зеленые водоросли, всего определено 104 вида водорослей восьми систематических групп: Bacillariophyta – 42; Chlorophyta – 24; Cyanobacter – 20; Chrysophyta – 6; Dinophyta – 2; Euglenophyta – 5; Cryptophyta – 3, Xanthophyta – 2. Основу флористического комплекса (89% от общего списка всех видов) составляли представители диатомовых, зеленых, цианобактерий, золотистых. Полученные данные сопоставимы с данными предыдущего периода исследований, когда доля видов четырех основных отделов составляла 88% от общего списка.

Ведущая по видовому разнообразию группа диатомовых представлена классами Centrophyceae и Pennatophyceae, что характерно для большинства водоемов Арктики и Субарктики (Гецен, 1985). Более разнообразно представлен род центрических *Aulacoseira* (9) а из пеннатных – *Nitzschia* (6), *Navicula* (6), *Pinnularia* (4). Из центрических диатомей в планктоне озера наиболее обычны виды *Aulacoseira granulata*, *A. italica* (Ehr.) Sim., *A. islandica* subsp. *helvetica* (O.Mül.) Sim., *A. distans* (Ehr.) Sim., *A. distans* var. *alpigena* (Grun.) Sim., *A. ambigua* (Grun.) Sim., *Melosira varians* C.Agard., а также несколько видов из родов *Stephanodiscus*, *Cyclotella*. Наиболее обычными и широко распространенными в альгофлоре Ведлозера оказались пеннатные диатомеи такие виды как *Asterionella formosa* Has. и *Tabellaria fenestrata*.

Второй крупный отдел – зеленые водоросли (24 таксона). Из этой группы водорослей таксономически разнообразный порядок зеленых водорослей вольвоксовые, представленные видами из родов *Chlamydomonas*, *Pandorina*, *Eudorina*.

Из цианобактерий наиболее разнообразны роды типичных для летней альгофлоры региона *Aphanizomenon*, *Dolichospermum* (*Anabaena* – 4 таксона), *Microcystis* (3), *Oscillatoria* (2), которые в водоемах умеренной зоны вызывают «цветение воды». Золотистые водоросли представлены видами из родов *Dinobryon*, *Mallomonas*, мелкоклеточных из рода *Kephyrion*. Разнообразие эвгленовых формируется представителями из родов *Trachelomonas* (4 таксона) и *Euglena*. Доля участия других отделов Xanthophyta, Cryptophyta, Dinophyta в формировании разнообразия альгофлоры невысока.

Залив за дамбой, ст. 1. В марте 2021 г. в этом районе озера отмечается преобладание цианобактерий, представленных *Dolichospermum flos-aquae* (Lyngb.) Breb., *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis wesenbergii* (Kom.) Starm. как по численности, так и по биомассе. Диатомовые, чей вклад в создание биомассы составил 39%, в основном принадлежали к роду *Aulacoseira*, широко распространенному в северных водоемах. Зеленые водоросли малочисленны, их вклад в создание биомассы также невелик. Общая численность зеленых до 910 тыс. кл/л, общая биомасса до 0.12 мг/л.

В мае 2021 г. концентрация хлорофилла а составляла 35.6 мкг/л. Доминирующий комплекс

фитопланктонного сообщества был сформирован диатомовыми водорослями (Рис. 2). Наиболее активно вегетировала *Aulacoseira italica* Kutz.Sim. var. *italica*, ее доля в общей биомассе 53.9%, в общей численности – 34.5%. *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim., также выступавшая доминантом весеннего планктона во всех изученных районах озера, достигала значений 0.97 г/м³, Максимум биомассы *Asterionella formosa* составил 0,25 мг/л. Зеленые вегетировали неактивно, в основном за счет представителей рода *Chlamydomonas*, до 10% в общей численности. В мае значения численности и биомассы выросли в несколько раз в сравнении этими показателями в марте 2021 г.

В июне 2021 г. в заливе обнаружено 28 видов фитопланктона, принадлежащих к 5 отделам, отмечается преобладание диатомовых водорослей, в основном принадлежащих к роду *Aulacoseira*: *Aulacoseira distans* var. *alpigena*, *A. granulata*, *A. islandica* subsp. *helvetica* *A. distans*. как по численности, так и по биомассе. Цианобактерии, представленные родом *Microcystis*, вегетировали в этой части водоема менее активно, чем в весной. Помимо зеленых водорослей, в массе представленных *Monoraphidium contortum* (Thur. in Breb.) Kom.-Legn., встречаются золотистые (*Dinobryon divergens* Imh.) и эвгленовые (*Trachelomonas volvocina* Ehr.). Общая численность 1018 тыс. кл/л, общая биомасса 0.73 мг/л.

В июле 2021 г. концентрация хлорофилла а составляла 90,8 мкг/л. В планктонном сообще-

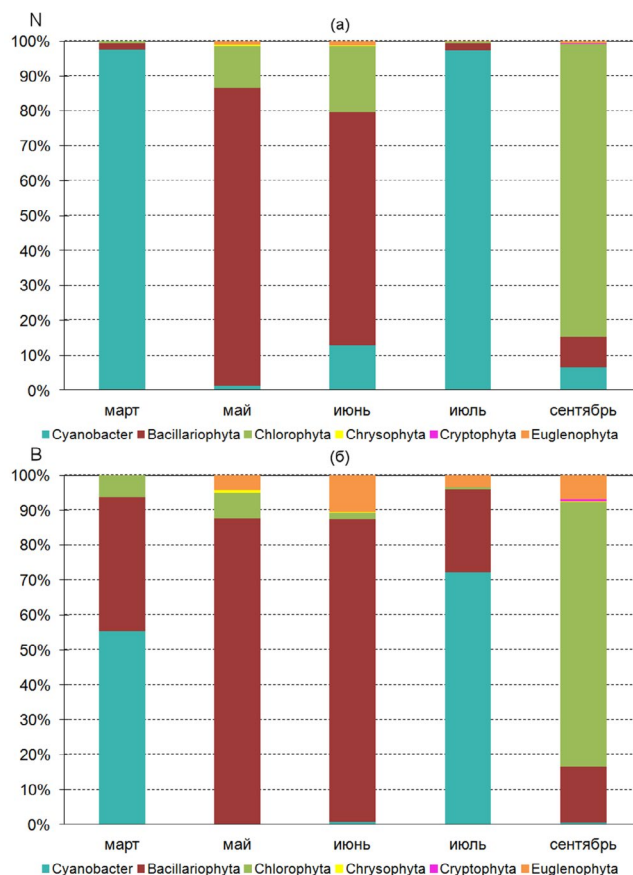


Рис.2. Динамика соотношения между численностью (N, тыс.кл./л) (а) и биомассой (B, мг/л) (б) водорослей разных систематических отделов (%) в заливе (ст. 1) в разные месяцы 2021 г.

стве по численности (97.5%) и биомассе (72.1%) доминировали цианобактерии (Рис. 2). При относительно небольшой биомассе (1.05 мг/л.) численность цианобактерий достигала значений 10307 тыс. кл/л вследствие малых объемов клеток цианобактерий. В этот период активно развивались *Dolichospermum flos-aquae* и *D. spiroides*, в совокупности их доля составила в суммарной численности до 70%, в суммарной биомассе до 58%. *Microcystis aeruginosa* по численности достигал значений 15.6% от общей, тогда как по биомассе только до 5,4%. Цианобактерия *Aphanizomenon flos-aquae*, будучи доминантом в озере в предыдущий период исследования (Озера..., 2013), была отмечена в этом районе озера летом, доля в общей биомассе до 8% от общей, как и *Snowella lacustris* (Chod.) Kom. et Hind (до 9% численности). Диатомовые также входят в комплекс доминантов по биомассе (до 24%) за счет видов *Aulacoseira distans* и *A. granulata*, по численности диатомовые – 1,8%.

В сентябре 2021 г. концентрация хлорофилла а составляла 39.7 мкг/л. Максимальные значения численности и биомассы фитопланктона наблюдались осенью за счет массового развития зеленых водорослей. Доминировали зеленые вольвоксовые водоросли (до 76% биомассы, 84% численности), *Eudorina elegans* Ehr. и *Pandorina morum* (O.F.Mull) Bory. Диатомовые составляли 16% по биомассе, 8,6% по численности, цианобактерии – менее 1% по биомассе и 6.2% по численности, эвгленовые – 6.2% по биомассе, менее 1% по численности.

Литоральная зона озера Ведлозеро характеризуется как эвтрофная с периодами политрофии во время вспышек цветения в летне-осенний период согласно шкалам типизации водоемов (Трифонов, 1990; Китаев, 2007)..

Центр, ст. 3. В центральной глубоководной части озера (ст. 3) максимальное развитие фитопланктона происходило в весенний период (Таблица 3). Доминантами весной выступали диатомовые водоросли, а летом и осенью – цианобактерии (Рис. 3).

Весной в центре озера на долю диатомовых приходилось 81% общей численности, 97% общей биомассы. Максимум численности (695 тыс. кл/л, 44% общей численности) и биомассы (5.534 мг/л, 81.6% общей биомассы) зафиксирован для *Melosira varians* (695 тыс. кл/л, 5.534 мг/л). В доминирующий комплекс также входила по численности *Aulacoseira islandica* (до 14%), заметно вегетировала *Asterionella formosa* (до 8% от общей численности, 1.2% от общей биомассы). На долю зеленых водо-



Рис.3. Динамика соотношения между численностью (N, тыс.кл./л) (а) и биомассой (B, мг/л) (б) водорослей разных систематических отделов (%) в центральной части оз. Ведлозеро в разные сезоны 2021г.

рослей приходилось 14.7% от общей численности, 1,1% от общей биомассы; максимальная численность отмечена для *Stichococcus* sp. (11.5% от общей численности). Численность цианобактерий, золотистых и эвгленовых водорослей составляла 1.1, 1.9 и 1.3% от общей численности; биомасса цианобактерий была крайне мала, не превышала долей процента от общей биомассы, для золотистых и эвгленовых достигала 0.5 и 1.2% соответственно.

В июле 2021 г. в центре озера концентрация хлорофилла а составляла 35 мкг/л. Активно развивались цианобактерии (89.9% общей численности, 68.2% общей биомассы), диатомовые (4.4% общей численности, 28.7% общей биомассы), зеленые (5.5% общей численности, 2.7% общей биомассы). Доли золотистых, эвгленовых и криптофитовых не превышали долей процента, как по численности, так и по биомассе. Доминирующий комплекс водорослей представлен видами из рода *Dolichospermum*,

Таблица 3. Сезонное распределение биомассы (мг/л) и численности (тыс. кл/л) фитопланктона в оз. Ведлозеро в период открытой воды 2021 г.

Станция	Сезон					
	Весна (май)		Лето (июль)		Осень (сентябрь)	
	Численность	Биомасса	Численность	Биомасса	Численность	Биомасса
Залив (ст. 1)	3305	3.703	10569	1.456	45663	24.029
Центр (ст. 3)	1560	6.781	21835	4.839	13575	1.890

вклад в формирование общей численности до 70%, а биомассы до 47%. Цианобактерия *Aphanizomenon flos-aquae*, также входившая в число доминант в озере ранее (Озера..., 2013), летом 2021 г. имела долю в общей биомассе до 19%. Диатомовые в доминирующем летнем планктоне представлены *Aulacoseira granulata* (16.5% от общей биомассы, 0.4% от общей численности).

В сентябре 2021 г. концентрация хлорофилла а в центре озера составляла 11.4 мкг/л. Основу численности осеннего фитопланктона в центре озера создавали цианобактерии (91.4%), теперь за счет развития *Microcystis aeruginosa*, его доля в общей численности 86.6%, биомассе – 18.5%. Численность диатомовых достигала 5.8%, зеленых – 2.5%, эвгленовых – 0.3%. Биомасса осеннего фитопланктона в этом районе озера находилась в пределах 1.89 мг/л, ее основу кроме цианобактерий (49.7%) формировали диатомовые водоросли (37.3%), активно развивались такие виды, такие как *Aulacoseira granulata*, *A. italica*, *Tabellaria fenestrata*. Биомасса зеленых водорослей достигала 10%, эвгленовых – 3.1%.

В сравнении с доминирующими по численности и биомассе видами фитопланктона в 1989 и 1992 гг. в число доминант вегетационного периода 2021г. вошли диатомовые *Aulacoseira italica*, *Asterionella formosa*, цианобактерии *Dolichospermum flos-aquae*, *D. spiroides* и *Microcystis wesenbergii*, зеленые *Eudorina elegans* и *Pandorina morum*. Ранее доминировавший *Ceratium hirundinella* встречается единично в летний период. В марте 2021г. обилие фитопланктона увеличилось на порядок, биомасса выросла незначительно в сравнении с данными за 1989 и 1992г. Это объясняется доминированием мелкоклеточных цианобактерий *Dolichospermum flos-aquae* и *Microcystis wesenbergii*.

Полученные количественные характеристики планктонного фитопланктона центральной части оз. Ведлозера характеризуют его как мезотрофный, согласно шкалам типизации водоемов (Трифонов, 1990; Китаев, 2007)..

Зоопланктон

В период наших исследований в 2021 г. в пелагиали озера отмечено 40 видов зоопланктона (Copepoda – 9, Cladocera – 14, Rotaria – 17). Количество видов в летний период колебалось от 24 до 26 и в среднем равнялось 25. Впервые в озере отмечен чужеродный вид американской коловратки *Kellicottia bostoniensis*. Она не достигла высокой численности (0.3 тыс.экз./м³) и отмечалась только осенью.

Видовое богатство или структура зоопланктонного сообщества озера Ведлозеро с учетом

его естественной и сезонной изменчивости являются типичным для озер данного региона Карелии. Индекс Шеннона-Уивера, отражающий биоразнообразие сообщества, был относительно высоким: 3,4-3,6 по численности и 2,8-3,3 по биомассе, что отражает благополучие в летней структуре зоопланктона.

В летний период в зоопланктоне доминировали ветвистоусые рачки (*Daphnia cristata* и *Bosmina coregonii*), составляя от 45 до 60% общей биомассы. Мелкие циклопы *Thermocyclops oithonoides* представляли 10-15% биомассы. Структура сообщества и соотношение основных групп зоопланктона в июле 2021 и 2022 г. были сходными.

Обычно более 70-80% биомассы летнего зоопланктона было представлено кладоцерами фильтраторами и мирными копеподами. Хищные кладоцеры и циклопы составляли около 15%. В июле 2022 г. отмечалось редкое в пробах явление массового развития крупного хищного рачка *Leptodora kindtii*, который составлял до 40% биомассы. Из-за этого произошло временное изменение в соотношении мирного и хищного планктона (1:1,5). В осеннем планктоне по численности и биомассе доминировали веслоногие рачки *Eudiaptomus graciloides* и *Thermocyclops crassus*.

Показатели летней биомассы пелагического зоопланктона в 0,9-1,6 г/м³ характеризуют планктонную систему как мезотрофную, но близкую к границе олиготрофии (Таблица 4).

Трансконтинентальный вид американской коловратки *K.bostoniensis* в настоящее время активно расширяет ареал обитания и распространяется на север по водоемам северо-запада России, в том числе и Карелии (Сярки и Здоровеннова, 2021; Syarki, 2019; Syarki et al., 2023). Поскольку аборигенная коловратка *K.longispina* не является кормовым объектом для рыб, появление сходного с ним чужеродного вида значимого влияния на биоресурсы не оказывает. Изменение его северной границы ареала может свидетельствовать об изменении климата.

Макрозообентос. Полученные нами данные о современном состоянии макрозообентоса свидетельствуют о том, что в 2021-2022 гг. численность донных организмов варьировала от 87 до 2000 экз./м², при биомассе – 1.51-6.39 г/м².

Сравнение литературных данных 1992 года и полученных результатов 2021 и 2022 гг. не показало снижения количественных показателей макрозообентоса. Используя критерий Манна-Уитни, не отмечалось достоверное изменение общей численности и биомассы зообентоса при сопоставлении двух периодов исследования (Рис. 4). Так, уровень

Таблица 4. Численность и биомасса зоопланктона оз. Ведлозеро

Дата	Численность, тыс.экз.		Биомасса, г	
	·м ³	·м ²	·м ³	·м ²
07.07.2022	46,7	373,7	0,88	7,01
13.07.2021	86,3	431,5	1,57	7,83
29.09.2021	24,1	180,6	0,81	6,04

статистической значимости выше критического значения 0.05, $p = 0.86$ при сравнении численности, и $p = 0.86$ при сравнении биомассы.

Доминирующий комплекс представлен личинками хирономид Chironomidae и малощетинковыми червями Oligochaeta. Богатая в количественном отношении фауна дна водоема не отличается большим разнообразием видов. В зообентосе озера Ведлозеро отмечено 6 систематических групп беспозвоночных, обычных для водоемов Северо-запада России – личинки хирономиды, малощетинковые черви, личинки поденок Ephemeroptera, двустворчатые моллюски Bivalvia и личинки мокрецов Ceratopogonidae, а также бокоплав. Всего идентифицировано 13 таксонов. Малошетинковые черви представлены двумя эвритопными видами *Tubifex tubifex* (Müller, 1774) и *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862. В мелководном районе озера Ведлозеро макрозообентос представлен личинками хирономидами Chironomidae (два рода *Chironomus* sp. и *Procladius* sp.). Редко встречаются личинки Ceratopogonidae.

В глубоководной части водоема присутствуют амфиподы *Pallasiopsis quarispinosa* (Sars, 1867). В районе впадения реки Вохтозерки отмечаются двустворчатые моллюски рода *Pisidium* sp.

Полученные данные соответствуют более ранним исследованиям. Так, по литературным источникам, донная фауна в озере Ведлозеро состоит в основном из представителей насекомых. Средняя численность – 325 экз./м², биомасса – 1,9 г/м². Доминирующий комплекс: хирономиды, олигохеты и Chaoboridae.

Ихтиофауна. В составе ихтиофауны обнаружены следующие виды рыб: ряпушка, щука, плотва, укля, лещ, синец, налим, окунь, ерш, судак, пелядь. Судак и пелядь – интродуцированы, судак является промысловой рыбой, пелядь – редка. Основными промысловыми рыбами являются лещ и окунь (Александров, 1957). В озере встречаются также бычок-подкаменщик, голянь, предположительно есть и сиг, выпущенный в Ведлозеро в 1949 – 1951 гг., и хариус, но это очень редкие рыбы. К редким рыбам относятся лосось и форель. Судак вселялся в оз. Ведлозеро в 1959 и 1964 гг. (Стерлигова и Ильмаст, 2009; Стерлигова и др., 2012; Стерлигова и др., 2016). Положительные результаты вселения судака отмечены авторами в Ведлозере (Кудерский и др., 1990).

Расчет рыбопродуктивности по показателям планктона.

Для расчета рыбопродуктивности был проведен анализ распределения органического вещества и энергии в трофических сетях озерной экосистемы оз. Ведлозеро с использованием балансовой модели В.В.Бульона (Häkanson and Boulion, 2002; Boulion, 2017).

Сравнение модельных данных с эмпирическими показало довольно близкое соответствие по прозрачности, уровню первичной продукции, биомассе зоопланктона. Оцененные по модели биомасса бентоса были несколько выше измеренных значе-

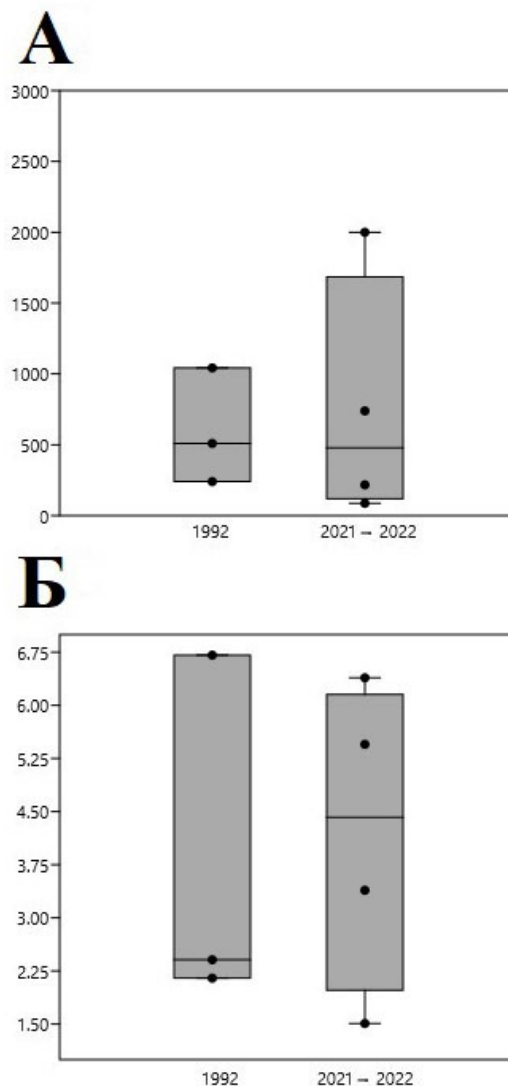


Рис. 4. Динамика изменений численности (А, экз./м²) и биомассы (Б, г/м²) макрозообентоса озера Ведлозеро в разные годы.

ний этих параметров (Таблица 5). Эмпирические данные содержания хлорофилла а выше модельных расчетов. Распределение биомассы планктона и бентоса озера Ведлозеро соответствовало закономерностям функционирования трофической сети экосистемы, что позволяет использовать модель для расчетов рыбопродукции и оценки возможных уловов в озере.

Модельные расчеты общей ихтиопродукции составила за сезон примерно 28 кг/га. Возможные годовые уловы могут составлять треть от ихтиопродукции и равны 9.6 кг/га.

Экосистема озера Ведлозеро обеспечивает кормовую базу для планктофагов, бентофагов и хищников (Рис.5).

Для сравнения с литературными данными (Озера..., 2013) в Таблице 5 приведены модельные величины (в ккал./м²·год) для фитопланктона, зоопланктона и бентоса были пересчитаны в сырую биомассу.

Таблица 5. Сравнение литературных, эмпирических и модельных данных по оз. Ведлозеро

Величина	(Озера Карелии, 2013)	Эмпирические данные	Модельные данные
Прозрачность, м	1.7	1.2	1.6
Хлорофилл а, мкг/л	3.2	23.2	5.9
Первичная продукция, гС/м ² год	50	-	49
Биомасса фитопланктона, г/м ³	1.05-1.12	7.4-20.0*	2.5
Биомасса зоопланктона, г/м ³	1.5	0,9-1.6	1.3
Биомасса бентоса, г/м ²	4.9	4.5	6.1
Возможные уловы, кг/га	12		9.6

Примечание: * – отдельные максимальные показатели фитопланктона (данные 2021 г.)

4. Выводы

В результате исследования и анализа было установлено современное состояние озера Ведлозеро по данным отбора проб в 2021 и 2022 гг. в сравнении с данными тридцатилетней давности.

Показано, что на современном этапе экосистема озера по гидробиологическим показателям соответствует мезотрофному статусу. Концентрация хлорофилла «а» увеличилась на порядок от 3 мкг/л в 1992 г. до 11-90 мкг/л в 2021 г. По уровню развития фитопланктона литоральная зона в северо-восточном районе озера, испытывающем значительный антропогенный прессинг, характеризуется как эвтрофная с периодами политрофии во время вспышек цветения. В летне-осенний период отмечаются эпизоды массового развития водорослей, в том числе, токсичных цианобактерий. На современном этапе вспышки цветения носят локальный характер. Возможной причиной их появления является синергическое влияние двух факторов: постоянной антропогенной нагрузки и продолжающегося

потепления климата в регионе. Также следствием продолжающегося потепления климата северо-запада России можно считать появление в озере чужеродного вида американской коловратки *Kellicottia bostoniensis*, впервые обнаруженного в озере в 2021 г.

Показано, что водные сообщества не претерпели заметных изменений с 90-х годов прошлого века. Планктонные сообщества находятся в стабильном состоянии и обеспечивают устойчивую кормовую базу рыб-планктофагов. Состав и структура бентосных сообществ также не изменилась с 90-х годов прошлого века. Ихтиофауна Ведлозеро включает следующие виды рыб: ряпушка, щука, плотва, уклей, лещ, синец, налим, окунь, ерш, судак, пелядь.

Анализ распределения органического вещества и энергии в трофических сетях озерной экосистемы оз. Ведлозеро с использованием балансовой модели В.В.Бульона показал, что результаты модельного расчета неплохо соответствуют эмпирическим данным. Расчеты показали, что возможные уловы (9/6 кг/га) составляют треть от ихтиопродукции.

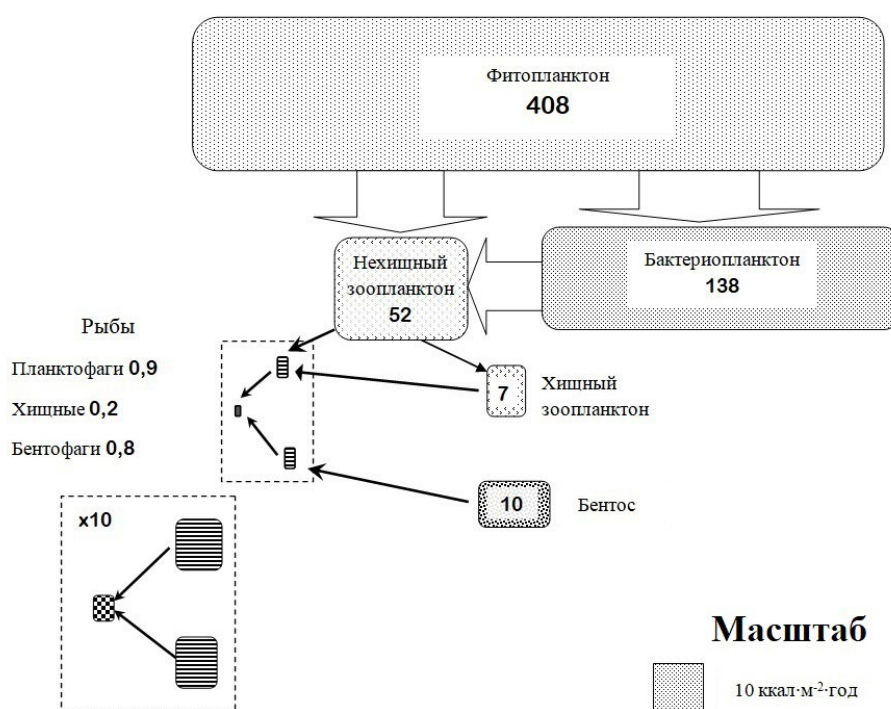


Рис.5. Годовая продукция (ккал·м²·год) основных звеньев экосистемы озера Ведлозеро.

Благодарности

Авторы сердечно благодарят за работу и инициативу написания рукописи старшего научного сотрудника лаборатории ИВПС КарНЦ РАН к.б.н. Андрея Павловича Георгиева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Abo-Taleb H.A., El-Tabakh M.A., Hendy D.M. 2023. Chapter 5 - Plankton and fish nutrition in African lakes. In: El-Sheekh M., Elsaied H.E. (Eds.), *Lakes of Africa Microbial Diversity and Sustainability*, pp. 139-172. DOI: [10.1016/B978-0-323-95527-0.00017-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95527-0.00017-8)

Austin J.A., Colman S.M. 2007. Lake Superior summer water temperatures are increasing more rapidly than regional air temperatures: A positive ice-albedo feedback. *Geophysical research letters* 34(6): 1-5. DOI: [10.1029/2006GL029021](https://doi.org/10.1029/2006GL029021)

Boulion V.V. 2017. Two versions of a balance model to predict the bioproductivity of aquatic ecosystems. *Water Resources* 44: 820-830. DOI: [10.1134/S0097807817050025](https://doi.org/10.1134/S0097807817050025)

Dobiesz N.E., Lester N.P. 2009. Changes in mid-summer water temperature and clarity across the Great Lakes between 1968 and 2002. *Journal of Great Lakes Research* 35(3): 371-384. DOI: [10.1016/j.jglr.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2009.05.002)

Dodds W.K., Bouska W.W., Eitzmann J.L. et al. 2009. Eutrophication of U.S. Freshwaters: Analysis of Potential Economic Damages. *Environmental Sciences and Technology* 43(1): 1-12. DOI: [10.1021/es801217q](https://doi.org/10.1021/es801217q)

Feng K., Deng W., Zhang Y. et al. 2023. Eutrophication induces functional homogenization and traits filtering in Chinese lacustrine fish communities. *Science of The Total Environment* 857(3). DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.159651](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159651)

Hampton S.E., Izmet'eva L.R., Moore M.V. et al. 2008. Sixty years of environmental change in the world's largest freshwater lake – Lake Baikal, Siberia. *Global Change Biology* 14: 1947-1958. DOI: [10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01616.x)

Häkanson L., Boulion V.V. 2002. *The Lake Foodweb – modelling predation and abiotic/biotic interactions*. Leiden: Backhuys Pablischers.

Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E. et al. 2016. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal. *Great Lakes Research* 42: 6-17. DOI: [10.1016/j.jglr.2015.11.006](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2015.11.006)

Le C., Zha Y., Li Y. et al. 2010. Eutrophication of Lake Waters in China: Cost, Causes, and Control. *Environmental Management* 45: 662–668. DOI: [10.1007/s00267-010-9440-3](https://doi.org/10.1007/s00267-010-9440-3)

Moss B., Kosten S., Meerhoff M. et al. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1(2): 101-105. DOI: [10.5268/IW-1.2.359](https://doi.org/10.5268/IW-1.2.359)

Proceedings of a Workshop on monitoring of Large Lakes. 1999. Joensuu.

Qin B., Zhang Y., Zhu G. et al. 2023. Eutrophication control of large shallow lakes in China. *Science of The Total Environment* 881: 163494. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.163494](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163494)

Schneider S.C., Cara M., Eriksen T.E. et al. 2014. Eutrophication impacts littoral biota in Lake Ohrid while water phosphorus concentrations are low. *Limnologica* 44:

90-97. DOI: [10.1016/j.limno.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.09.002)

SCOR-UNESCO Working Group № 17. 1966. Determination of photosynthetic pigments in sea water. *Monographs on Oceanographic Methodology*, 1. Paris: UNESCO.

Syarki M., Sidorova A., Georgiev A. et al. 2023. Biological resources of Lake Kroshnozzero (North-West of Russia). *E3S Web of Conferences* 420: 09007. DOI: [10.1051/e3sconf/202342009007](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342009007)

Syarki M.T. 2019. The Invasion of the American Rotifer *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908) (Rotifera: Brachionidae) into Vygozersky Reservoir (Republic of Karelia, Russia). *Russian Journal of Biological Invasions* 10: 382-386. DOI: [10.1134/S207511171904009X](https://doi.org/10.1134/S207511171904009X)

Tsai C.W., Chiang C.-H., Shen S. 2022. Probabilistic eutrophication risk mapping in response to reservoir remediation. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 44: 101213. DOI: [10.1016/j.ejrh.2022.101213](https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101213)

Xia R., Zhang Y., Critto A. et al. 2016. The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. *Sustainability* 8(3): 229. DOI: [10.3390/su8030229](https://doi.org/10.3390/su8030229)

Zhang C., McIntosh K.D., Sienkiewicz N. et al. 2023. Using cyanobacteria and other phytoplankton to assess trophic conditions: A qPCR-based, multi-year study in twelve large rivers across the United States. *Water Research* 235: 119679. DOI: [10.1016/j.watres.2023.119679](https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119679)

Александров Т.Н. 1957. Условия обитания рыб в Ведлозерском водохранилище и мероприятия по их воспроизводству. В: Кожин Н.И. (ред.). *Рыбное хозяйство Карелии. Карельский научно-исследовательский институт*. Петрозаводск: Гос.изд. КАССР, С. 135-142.

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

Ефремова Т.В., Пальшин Н.И., Белашев Б.З. 2016. Температура воды разнотипных озер Карелии в условиях изменения климата (по данным инструментальных измерений 1953–2011 гг.). *Водные ресурсы* 43(2): 228-238.

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

Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. 2004. В: Филатов Н.Н. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Кудерский Л.А., Орлов Ю.И., Шимановская Л.Н. 1990. Акклиматизация рыб во внутренних водоемах. *Рыбное хозяйство, серия «Аквакультура»: Обзорная информация*. Москва: ВНИЭРХ.

Литвинов А.С., Законнова А.В. 2012. Термический режим Рыбинского водохранилища при глобальном потеплении. *Метеорология и гидрология* 9: 91-96.

Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. 1975. В: Мордухай-Болтовский Ф.Д. (ред.). Москва: Наука.

Назарова Л.Е. 2014. Климат Республики Карелия (Россия): температура воздуха, изменчивость и изменения. *Геополитика и экогеодинамика регионов* 10(1): 746-749.

Назарова Л.Е. 2014. Изменчивость средних многолетних значений температуры воздуха в Карелии. *Известия Русского географического общества* 146(4): 27-33.

Озера Карелии. Справочник. 2013. В: Филатов Н.Н., Кухарева В.И. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Сабылина А.В., Ефремова Т.А. 2022. Изменение химического состава вод озера Ведлозеро и отдельного его залива в результате антропогенного эвтрофирования. *Труды Карельского научного центра РАН* 8: 20-30. DOI: [10.17076/eco1718](https://doi.org/10.17076/eco1718)

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В., Савосин Д.С. 2016. Круглоротые и рыбы пресных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН.

Стерлигова О.П., Ильмаст Н.В. 2009. Виды-вселенцы в водных экосистемах Карелии. Вопросы ихтиологии 49(3): 372-379.

Стерлигова О.П., Рюкшиев А.А., Ильмаст Н.В. 2012. Результаты рыбоводных работ по расселению *Sander lucioperca* в водоемы Карелии. Вопросы ихтиологии 49(4): 558-560.

Сярки М.Т., Здоровеннова Г.Э. 2021. Видовой состав зоопланктона озера Вендюрского (Республика Карелия). Труды КарНЦ РАН 8: 80-89.

Трифорова И.С. 1990. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Ленинград: Наука.