

Mesohalobic diatom species in the freshwater Lake Itkul (Khakassia, Russia)

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYMakeeva E.G.^{1,2}, Mikhajlina N.R.², Semenova V.V.²¹Khakassky State Nature Reserve, Tsukanovoi Str., 164 Abakan, 655017, Russia²Katanov Khakassky State University, Lenina Str., 90, Abakan, 655017, Russia

ABSTRACT. This study presents a list of mesohalobic diatom species found in the freshwater Lake Itkul between 2006 and 2025. The lake is located in the steppe zone of the Republic of Khakassia, within the Bele-Shirinsky endorheic region. We identified 28 species and intraspecific taxa of mesohalobic diatoms belonging to 17 genera. Mesohalobes are typically scarce and play no significant role in the algocenosis; however, their diversity and development intensity in the periphyton are slightly greater than in other communities. The occurrence frequency is provided for each taxon. The most active species in the periphyton in terms of relative occurrence frequency are: *Navicula capitatoradiata* H. Germain ex Gasse (up to 90%), *Mastogloia danseyi* (Thwaites) Thwaites ex W. Smith (up to 53.3%), *M. elliptica* (C. Agardh) Cleve (up to 44.2%), and *Nitzschia denticula* Grunow (up to 69.8%). In 2024–2025, there was a significant increase in the local populations of *Navicula capitatoradiata* and *Mastogloia elliptica* in the epilithon and epiphyton communities. A decrease in lake water levels, caused by the annual rise in air and water temperatures alongside localized salinization of the littoral zones, likely impacts the percentage ratio of salinity indicator groups and the proliferation of mesohalobic species.

Keywords: diatoms, mesohalobic species, freshwater lake, Republic of Khakassia

For citation: Makeeva E.G., Mikhajlina N.R., Semenova V.V. Mesohalobic diatom species in the freshwater Lake Itkul (Khakassia, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2026. - № 4. - P. 372-390. DOI: 10.31951/2658-3518-2026-A-4-372

1. Introduction

Mesohalobes inhabit the brackish coastal waters of seas and estuaries, as well as continental waters with salinity ranging from 5‰ to 20‰ (Barinova et al., 2006). Members of this group rarely predominate in typical freshwater lakes but are identified there as indicators of localized increases in mineralization. Numerous researchers reported on the presence of mesohalobes in diatom assemblages of freshwater ecosystems in Siberia (Popova, 1946; Mitrofanova et al., 2007; Pestryakova and Sleptsova, 2007; Genkal et al., 2011; etc.). Such species are scarce and do not play a significant role in algal communities.

Some freshwater lakes in Khakassia (Southern Siberia), the steppe arid zone, are also characterized by mesohalobic representatives of diatoms in the algal population. Largely, these species are sporadically encountered and have low abundance. However, in recent years, isolated cases of their mass development

have been observed in epilithic and epiphytic communities of Lake Itkul, one of the large freshwater lakes in Khakassia.

Diatoms have a high potential as indicators of changes in most habitats, given the known regional relationships between them and the environment (Pestryakova et al., 2018). The bedrock type in a catchment, among other natural influences, determines the water's total mineralization and ionic composition, which are crucial for diatom communities (Ziemann, 1997).

Lake Itkul has low mineralization compared to other lakes in the Shirinsky District of Khakassia because its basin is located mainly in the carbonate deposits of the Beyskaya suite of the Middle Devonian, while mineralized reservoirs, are normally located in the red-colored deposits of the Upper Devonian and Lower Carboniferous (Arkhipova et al., 2014). At the same time, in the soil cover of the lake basin, represented mainly by various ordinary and southern cher-

*Corresponding author. E-mail address: meg77@yandex.ru (E.G. Makeeva)

Received: May 12, 2026;

Accepted after revised: August 10, 2026;

Available online: August 28, 2026

© Author(s) 2026. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



nozems and meadow soils, there are also solonetzic and solonchak soils (Tanzybaev, 1993).

Climate change significantly impacts salinity levels. This has led to faster salinization, which is apparent in both regional and global trends. However, individual lakes may show high variability in their response to climate change (Stenger-Kovács et al., 2023).

Average annual temperatures (Pozdnyakov, 2025) and precipitation (Nikolayeva and Nikolayev, 2014) have increased in Khakassia, which may lead to changes in the mineralization of water bodies. Researchers indicated a decrease in salinity and a rise in water levels in some lakes of the Shirinsky District of the Republic of Khakassia (Zadereev et al., 2021). However, there is no information on an increase or decrease in the mineralization of Lake Itkul. Without annual data on the lake's mineralization, it is difficult to assess its impact on the algal population. However, we can monitor changes in the lake water level, as a hydrographic post was installed on the reservoir in 2019 at the initiative of the reserve management. Fluctuations in this level affect the composition of algal communities and the balance of ecological groups in relation to various environmental factors, including the level of total mineralization.

On the one hand, mesohalobic algae are reliable indicators of increasing salinity, and their large development signals a rearrangement of the lake ecosystem. Salinization can have a significant impact on the functions and services of ecosystems through biodiversity loss and changes in the composition of aquatic commu-

nities, involving the dominance of salt-tolerant species and the spread of invasive species (Stenger-Kovács et al., 2023). In the meantime, mesohalobic species represent only a small part of the diverse algal community in Lake Itkul, which includes 431 species (466 specific and intraspecific taxa). To confirm the impact of climate change, it is important to analyze the seasonal and interannual dynamics of the structural and functional parameters of the lake's entire algal flora and identify the factors that determine their variation within the water body. Investigating the relationships between biocenosis elements and water level conditions enables assessment of likely future trends in ecosystem alteration under given climate changes, involving the lake filling regime (Doganovsky, 2007).

The aim of this study is to identify the species composition of mesohalobic diatoms in the freshwater lake Itkul, the characteristics of their distribution, and occurrence frequency in different biotopes of the lake.

2. Materials and methods

2.1. Study area

Lake Itkul is situated in the Chebakovo-Balakhtinskaya depression area, which is part of the Nazarovo-Minusinsk intermountain valley. It lies within the Bele-Shirinskaya endorheic area, a region of the Iyuso-Shirinskaya Steppe. It is administratively part of the Shirinsky District of the Republic of Khakassia. The waters of Lake Itkul are protected, being included in the Khakassky State Nature Reserve (Fig. 1).

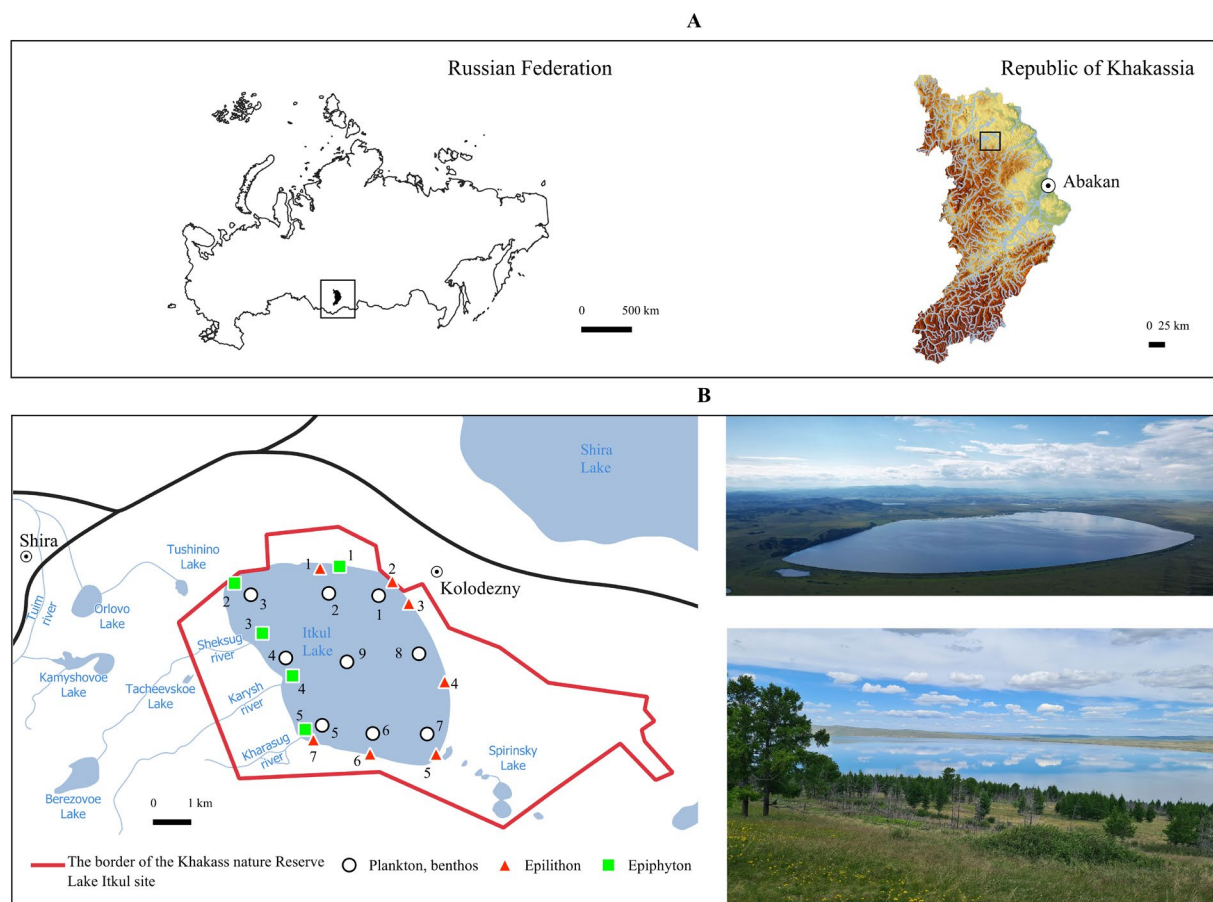


Fig.1. Geographical location of Lake Itkul and sampling stations. A–Location of the lake on the map of the Russian Federation and the Republic of Khakassia; B–Sampling stations.

Mineralized lakes are abundant in the Chebakovo-Balakhtinskaya depression region because its climate is strongly continental and dry (Parnachev and Degermendzhy, 2002). Lake Itkul has a surface area of 23.25 km², a maximum depth of 17 m, and an absolute waterline of 456.2 m. Geologically, the lake basin is confined to a large synclinal structure of the same name. Dominant sedimentary formations include gray limestones and marls, along with lesser amounts of calcareous siltstones and sandstones. Swampy conditions prevail on the western and southwestern lake shores, characterized by soddy-sedge and reed marshes in the lowlands. The Karysh River, Kharasuk and Shelsug streams, as well as the small Tushininsky Stream, flow into the lake there (Natural Waters..., 2003). The bottom sediments of Lake Itkul in the lakeside zone are composed of crushed rock, coarse sand, and pebbles. At greater depths, namely over 3 m, fine silts predominate.

The hydrological regime of the lake is subject to periodic fluctuations and depends on the runoff of inflowing rivers and streams, the amount of precipitation, and the influx of underground and groundwater into the basin (Arkhipova et al., 2014). The lake shares a hydrochemical system with the saline Lake Shira, where it serves as a flow-through reservoir for water and dissolved salts. Evaporation has a significantly lesser effect on the hydrochemical balance of Lake Itkul than Lake Shira; there is a higher intensity of water exchange in Lake Itkul (Guseva and Savichev, 2016).

The lake waters are classified as sodium-magnesium hydrocarbonate water (Guseva and Savichev, 2016), with a pH of 8.6–9.0. Water mineralization was 0.68 g/L in 1904, 0.69 g/L in 1989 and 1995 (Natural waters..., 2003), and 0.55 g/L in 2015. The lake waters contain 293 mg/L of hydrocarbonates, 12.2 mg/L of carbonates, 76.0 mg/L of sulfates, and 32.0 mg/L of chlorides (Guseva and Savichev, 2016). In 2019, dry residue amounted to 0.4 g/L, including 231.8 mg/L of hydrocarbonates, 67.2 mg/L of sulfates, 35.0 mg/L of chlorides, and 36.0 mg/L of carbonates (Zadereev et al., 2021).

2.2. Sample collection and analysis

The species composition of planktonic, benthic, and periphytic algae in Lake Itkul was investigated from 2006 to 2009. Thereinafter, phytoplankton was studied annually. Epilithic diatom communities were analyzed from 2023 to 2025, and reed diatom epiphyton was analyzed in 2024–2025.

From 2006 to 2009, samples were collected at nine stations in the central and littoral zones of the lake (Fig. 1). Phytoplankton samples were taken from the pelagic part of the lake, 0.5 to 0.1 m from the surface, using a Ruttner bathometer and an Apstein's net (mesh size 64 µm). Benthic samples were collected by lot or by scooping into a bottle from different depths. Phytoepiphyton samples with *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud were collected from 2003 to 2025 at five stations along the northern, southern, and western shores of Lake Itkul. Submerged reed stems (3–5 stems) were cut, and the fouling was scraped off using a scalpel into a container. Phytoepilithon samples were

collected from 2022 to 2025 at seven stations along the northern, eastern, and southern shores of the lake at depths of 0–1 m. All biological material was rinsed and scraped from the rocks using distilled water, a scalpel, and a toothbrush. At each station, composite samples were obtained from ten rocks. Samples were preserved with 40% formaldehyde.

To prepare permanent specimens, we used a method of burning samples with a mixture of concentrated sulfuric acid and potassium dichromate; in recent years (2024–2025), we used hydrogen peroxide, and specimens were prepared using Elyashev medium. Determination was carried out using an Olympus CX41 light microscope, taking into account the relative abundance according to the Starmach scale (Algae..., 1989); dominant and co-dominant species were identified, corresponding to 5 and 4 points on the scale, respectively. The relative taxon occurrence (activity) frequency was calculated as a percentage of the total number of samples (Devyatkin and Mitropolskaya, 2002) for all identified species of various algal divisions and all communities in 2006–2009, and only for diatoms, separately in epilithon and epiphyton—in subsequent periods (2023–2025). The dominance frequency was calculated as the percentage of samples in which the species abundance was 4 or 5 points relative to the total number of epilithon or epiphyton samples.

The names and systematic affiliation of taxa were given according to AlgaeBase (Guiry and Guiry, 2026); the ecological characteristics of diatoms were assessed according to the database of ecological indicators of freshwater algae and cyanobacteria (Barinova, 2025).

The graphs of the interannual distribution of precipitation and average air temperature were constructed using data from the Khakassia Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, a branch of the Central Siberian Hydrometeorological Center (Shira weather station). The diagrams of the water level and temperature of Lake Itkul were based on data from the hydrographic station on Lake Itkul during the open-water period.

3. Results

The lake diatoms are characterized by high species richness and include 301 species (324 specific and infraspecific taxa) belonging to 3 classes, 14 orders, 30 families, and 71 genera. The diatom community of Lake Itkul is predominantly freshwater, with a large contribution of brackish-water species; mesohalobes and euryhaline species are less common (Fig. 2).

In terms of water salinity, the lake is dominated by indifferent species, which amount to 62.3% of the total number of species, and intraspecific taxa, as well as by halophiles (12.3%). Halophobes account for 8.95% of the taxonomic diversity of diatoms; euryhaline diatoms amount to 0.3% (*Opephora mutabilis* Sabbe & Wyverman). Twenty-seven species (28 specific and infraspecific taxa) were identified in the lake as mesohalobes (8.6%), including the following species:

Ctenophora pulchella (Kützinger) D.M. Williams & Round, found in the fouling of reeds and stones in 2006–2009 (occurrence 0.9%);

Tabularia tabulata (C. Agardh) Snoeijs, found in coastal plankton in 2006–2009 (occurrence 0.9%);

Anomoeoneis costata (Kützing) Hustedt, found in reed foliage in September 2025 (0.9% occurrence). The species may have been introduced by birds during autumn migration from the nearby Lake Shira;

Anomoeoneis sphaerophora Pfitzer, found in lake-side plankton and in the silt in the middle of the lake in 2006–2009 (occurrence 1.8%). In August 2025, the species was found on reeds near the mouth of the Karysh River on the western shore (occurrence 2.3% from June to September);

Gomphonema salinarum (Pantosek) Cleve, found in stone fouling in 2006–2009 (occurrence 0.9%) in the southwestern part of the lake;

Navicymbula pusilla (Grunow) Krammer, found in lakeside plankton and silt (west coast) in 2006–2009 (occurrence 2.8%);

Navicula capitatoradiata H. Germain ex Gasse is the most widespread species, found in all communities except for soils with an admixture of clay and the *Chara tomentosa* fouling. Between 2006 and 2009, its occurrence across all communities was 16.5%, and 49% in periphyton. In 2024–2025, its occurrence in epilithon was 47.5–86.6%; in epiphyton, it was 50–62.8%; data were obtained from June to September. In August 2025, its occurrence was 90.0%. In 2024, it occurred as a codominant in the epilithon on the eastern shore of the lake in September; while in July, it predominated in the reed epiphyton on the western shore. From May to September, the species was found throughout the entire water area;

Navicula kefvingensis (Ehrenberg) Kützing, found in the silt of the western shore in the fouling of Crested pondweed in 2006–2009 (occurrence 1.8%);

Prestauroneis crucicula (W. Smith) Genkal & Yarushina, found in silt, in the middle of the lake, on sandy ground, and in lakeside plankton in 2006–2009 (occurrence 1.8%); in July 2025, it was found in reed periphyton (occurrence from June to September was 2.3%);

Prestauroneis protracta (Grunow) Kulikovskiy & Glushchenko, found on sandy-silty soil in 2006 (0.9% occurrence). In 2025, it was found in the stone fouling in July (2.5% occurrence) on the eastern shore of the lake;

Craticula halophila (Grunow) D.G. Mann, found in lakeside plankton, on rocks, in the fouling of Crested pondweed, Shining pondweed, and *Chara tomentosa* in 2006–2009 (occurrence 1.8%); in 2025, it was found in epilithon in August (occurrence 2.5%) and in reed periphyton (occurrence 9.3%) from June to September, most active in August (20%);

Craticula halophila var. *subcapitata* (Østrup) Czarnecki, found in the fouling of reed and *Chara tomentosa* in 2006–2009 (occurrence 1.8%);

Mastogloia braunii Grunow, found in lakeside plankton, in the fouling of reed and Amphibian knotweed, and on rocks in 2006–2009 (occurrence rate 5.5% for all communities). In 2023–2025, it was found in the epilithon of the southern shore (occurrence rate over the entire study period from May to September was 7.7%; in August, it was 14.3–28.6%);

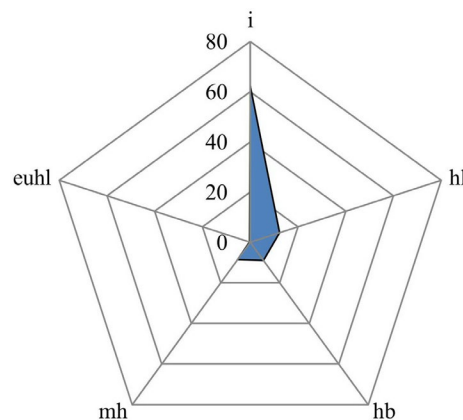


Fig.2. Distribution of diatoms-indicators of water salinity in Lake Itkul, % (i-indifferent species; hl-halophiles, hb-halophobes, mh-mesohalobes, and euhl-euryhaline).

Mastogloia danseyi (Thwaites) Thwaites ex W. Smith, found in 2006–2009 in lakeside plankton, western shore silt, sandy-silty soil, reeds, Shining pondweed, *Chara*, and stones (occurrence 16.5% for all communities). Its rates in epilithon were 7.7% in 2023, 53.3% in 2024, and 30% in 2025. The species was most active in August near the southern shore of the lake. Occurrence in reed epiphyton was 34.9%, also more active in August;

Mastogloia elliptica (C. Agardh) Cleve, found in lakeside plankton, silt from the middle of the lake, on sandy, sandy-pebbly bottom, reeds, stones in 2006–2009 (occurrence of 0.9% for all communities). In the epiphyton, the occurrence of the species was 23.1% in 2023, 26.6% in 2024, and 25.0% in 2025. During each of the recent years, high activity of the species has been recorded in August; particularly in August 2025, the species dominated near the southern shore. In 2024–2025, the species was found in 41.7–44.2% of samples in the reed epiphyton. High activity of the species is characteristic of August;

Mastogloia smithii Thwaites ex W. Smith, found in all communities except for the silt from the middle of the lake, soils mixed with clay, and sand. Previously, in 2006–2009, its occurrence in all communities was 31.2%; notably, in plankton it was 18.0–28.0%. In 2023–2025, the species was found in 7.7–22.5% of epilithon samples with peak activity in August;

Achnanthisdium biasoletianum (Grunow) Lange-Bertalot, found in epilithon between 2006 and 2009 (occurrence 0.9%);

Crenotia gibberula (Grunow) Wojtal, found previously in lakeside plankton, silt of the western shore, in the fouling of stones and macrophytes (occurrence 1.9%) in 2006–2009;

Crenotia thermalis (Rabenhorst) Wojtal, found only in lakeside plankton in 2006–2009 (0.9% occurrence);

Halampfora coffeiformis (C. Agardh) Mereschkowsky, found in lakeside plankton, silt from the middle of the lake, and on Crested pondweed in the western part of the lake between 2006 and 2009 (24.6% occurrence). In recent years, the species has not been detected in plankton or in the fouling of rocks and reeds;

Halamphora perpusilla (Grunow) Q.-M. You & Kociolek, found only in sediments in 2006–2009, namely, in silt from the middle of the lake, sandy-silty, and sandy-pebbly sediments (7.3% occurrence). Benthic composition was not studied between 2010 and 2025;

Amphora affinis Kützing, found on reeds in July 2024 on the western shore (8.33% occurrence);

Rhopalodia gibberula (Ehrenberg) O. Müller, found in 2006–2009 in lakeside plankton and silt, and in fouling (18.3% occurrence). In recent years, sporadic occurrences have been recorded from May to September in epilithon. Occurrence was 7.7% in 2023, 26.6% in 2024, and 2.5% in 2025;

Nitzschia commutata Grunow, found only on sandy bottoms with sporadic occurrences in 2006–2009 (0.9% occurrence);

Nitzschia denticula Grunow, found in 2006–2009 in lakeside plankton, on sand, rocks, sandy-silty soil, reeds, pondweed, and chare (occurrence rate 11.9%). Occurrence in epiphyton was 7.7% in 2023, 13.3% in 2024, and 25.0% in 2025. Occurrence in reed epiphyton in 2024–2025 ranged from 50.0 to 69.8%, with the species being more active in August;

Tryblionella apiculata W. Gregory, found on reeds in August–September 2025, occurrence rate of 10.0–11.1%;

Tryblionella hungarica (Grunow) Frenguelli, found from 2006 to 2009 on sandy-pebble soil (0.9% occurrence);

Surirella ovalis Brébisson, found from 2006 to 2009 on reeds in the western part of the lake (0.9% occurrence); in recent years, it has also been found on reeds (2.3% occurrence).

Species recorded in the plankton were characteristic mainly of samples collected with Apstein's net. Quantitative samples contained only *Navicula capitato-radiata* ($0.5\text{--}1.63 \times 10^3$ cells/L) and *Crenotia gibberula* ($0.2\text{--}0.5 \times 10^3$ cells/L). Most mesohalobic species were found in the benthos and periphyton.

The most important natural feature of the lakes in the steppe zone of Khakassia is the cyclical fluctuation in water levels caused by variability in overall moisture content. Precipitation has a direct and significant impact on the dynamics of lake mineralization. Increased precipitation typically leads to a decrease in mineralization due to water dilution, while a reduction in precipitation enhances salt concentrations, especially in endorheic reservoirs. The distribution of annual precipitation totals, according to data from the Shira meteorological station, is shown in Fig. 3A. Over the past decade (2016–2025), annual precipitation has increased by 44.9 mm compared to the 2006–2015 period.

A potential reason for the development of mesohalobic algae is a gradual increase in annual atmospheric air temperature. This factor affects the course of physicochemical processes and is typically reflected in the chemical composition of natural waters (Drovovozova

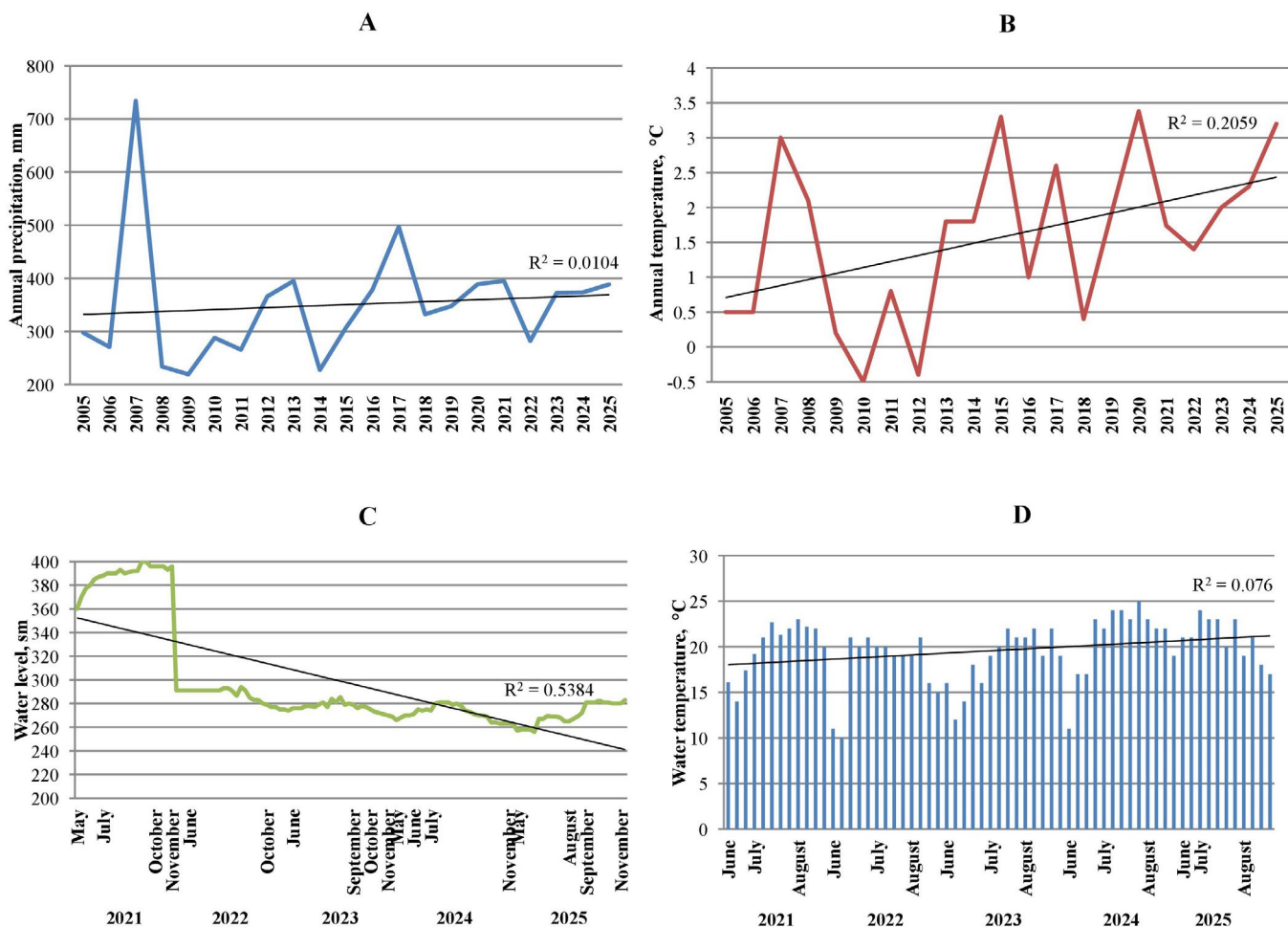


Fig.3. Weather conditions in the study area and hydrological characteristics of Lake Itkul. A–change in annual precipitation according to the Shira weather station; B–change in average annual air temperature according to the Shira weather station; C–water level in Lake Itkul; D–water temperature in Lake Itkul.

and Kirilenko, 2021). Analysis of long-term observation data at the Shira meteorological station demonstrates an increase in average annual air temperature over the past 20 years (Fig. 3B). Moreover, from 2022 to 2025, the lake water level decreased, and the temperature increased (Fig. 3C, D).

Rising air temperatures can lead to higher evaporation rates, especially in shallow water. This can cause localized salinization, which affects the composition of epilithic and epiphytic communities. Additionally, increased precipitation can cause salts to leach from saline soils in the lakeside zone, potentially increasing the influx of salts into the lake through surface runoff.

4. Discussion

During the observation period from 1934 to 2025, the species composition and the development degree of mesohalobic species in the lake underwent certain changes. All species discovered by T.G. Popova (1946) in 1934 during the investigation of Lake Itkul were found in our samples taken during the 2006–2009 period: *Ctenophora pulchella*, *Achnanthes biasolettianum*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Prestauroneis crucicula*, *P. protracta*, *Craticula halophila*, *C. halophila* var. *subcapitata*, *Navicymbula pusilla*, *Nitzschia denticula*, and *Tryblionella hungarica*. However, from the genus *Mastogloia*, only *M. lacustris* (Grunow) Grunow halophile was included in the species list, which currently dominates the periphyton and occurs with high frequency. By 2025, six species of the genus *Mastogloia* have been identified in the lake, including typical representatives of the lake mesohalobe complex: *M. braunii*, *M. danseyi*, *M. elliptica*, and *M. smithii*. In addition to the abovementioned species, the following ones were also present in samples throughout the study period since 2006: *Navicula capitatoradiata*, *Nitzschia denticula*, *Rhopalodia gibberula*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula halophila*, *Prestauroneis crucicula*, *P. protracta*, and *Surirella ovalis*.

Some species identified in the 2006–2009 period have not been found in recent years, possibly due to the absence of benthic samples. These include *Halamphora perpusilla*, *H. coffeiformis*, *Tabularia tabulata*, *Gomphonema salinarum*, and others.

In 2024–2025, new and inactive species appeared in the reed epiphyton of the lake, namely *Anomoeoneis costata*, *Amphora affinis*, and *Tryblionella apiculata*.

Our study involved assessing the distribution of mesohalobic diatoms in algal communities. Fifteen species and intraspecific taxa of mesohalobic diatoms belonging to the genera *Tabularia*, *Mastogloia*, *Navicymbula*, *Crenotia*, *Craticula*, *Halamphora*, and *Rhopalodia* were identified in the lake plankton. They were encountered sporadically, not every year, and in isolated numbers.

Overall, 18 mesohalobic species were present in the bottom sediments. Most of them were found in the silt along the western shore: *Navicymbula pusilla*, *Navicula kefvingsensis*, *Mastogloia danseyi*, *M. smithii*, etc. In the silt of the central part of the lake, the following species were identified: *Anomoeoneis sphaerophora*,

Prestauroneis crucicula, *Halamphora coffeiformis*, etc. As a rule, they showed a low occurrence frequency (up to 2.7%) in the structure of benthic cenoses, except for several species, which were found rather frequently: *Mastogloia danseyi* (27.7%), *M. smithii* (25.0%), *Navicula capitatoradiata*, and *Halamphora perpusilla* (22.0%).

The diversity and intensity of development of mesohalobic diatoms in the periphyton were slightly greater than in other communities. In particular, 23 species and intraspecific taxa were found here. Recently, a large development has been recorded for the species *Mastogloia*, which predominated in the stone fouling in 2025 (station 7), and *Navicula capitatoradiata*, which codominated in the epilithon in September (station 3) and prevailed in the epiphyton at one of the stations in July 2024 (station 3). The dominance of these species was localized in certain areas of the water body. The dominance frequency of *Navicula capitatoradiata* amounted to 7.7% in the epiphyton and 6.7% in the epilithon; for *Mastogloia elliptica*, it was 2.5% in the epiphyton. In August 2025, there was a relatively high occurrence of the species *Navicula capitatoradiata* (90.0%, epiphyton), *Nitzschia denticula* (80.0%, epiphyton), *Mastogloia danseyi* (55.6%, epiphyton), *M. smithii* (71.4%, epilithon), and *M. elliptica* (70.0%, epiphyton and 57.1%, epilithon) in epilithic and epiphytic communities.

The investigation of the spatial distribution revealed a higher diversity of mesohalobic forms in the reed periphyton from the middle part of the western shore of the lake (stations 3, 4). Seven species were found at each of these stations: *Mastogloia danseyi*, *M. elliptica*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Prestauroneis crucicula*, *Navicula capitatoradiata*, *Nitzschia denticula*, and *Tryblionella apiculata*. In the epilithon, it was associated with the southern and southwestern shores (stations 6, 7) and also included seven species: *Navicula capitatoradiata*, *Mastogloia braunii*, *M. danseyi*, *M. elliptica*, *M. smithii*, *Rhopalodia gibberula*, and *Nitzschia denticula*. In temporal dynamics, the peak of species diversity and quantitative development occurred in August 2025.

According to the characterization by Popova (1946), the flora of Lake Itkul is a freshwater-saltwater one, dominated by indifferent and euryhaline species in the plankton and benthos, with a sporadic appearance of halophiles or mesohalobes. The author observed the abundance of halophiles on the western shore, where they thrived at the mouths of some streams. Our findings confirm these observations. In addition to the development of halophilic and mesohalobic forms of diatoms along the marshy western shore, this section of the water body was characterized by a low abundance of desmids, most of which prefer waters with low salt concentrations. The presence of halophilic macrophytes may also indicate high water mineralization in some lakeside areas. For example, Volobaev (1992) reported on the rather unusual occurrence of *Ruppia maritima* L. in Lake Itkul because the species is an obligate halophyte.

The occurrence of mesohalobes in the reed fouling at the confluence of the Karysh River is noteworthy, since there is no data on the high salinity of the river

itself, and the mineralization of the waters is 357–446 mg/L (Kopylova et al., 2005). However, Popova (1946) observed halophiles and mesohalobes, along with purely freshwater forms, in the benthos of the water-course associated with Lake Itkul, indicating significant salinization of the silt.

Members of the genus *Mastogloia* are among the most common diatoms in Lake Itkul. Most taxa of this genus inhabit marine environments, with only a small number inhabiting freshwater ecosystems. They prefer submerged plants, rocks, and bottom sediments as substrates; they thrive in a wide variety of freshwater habitats, including streams, rivers, lakes, ponds, sphagnum bogs, and others. The species *Mastogloia danseyi* and *M. elliptica*, inherent in Lake Itkul, were found in significant quantities in swamps, small rivers, and mineral springs of Macedonia among the inhabitants of epiphyton and epilithon (Pavlov et al., 2016). *Mastogloia braunii*, *M. elliptica*, and *M. smithii* were detected in freshwater lakes of the Chelyabinsk Oblast (Yarushina et al., 2004).

Many researchers indicated mesohalobic diatoms in freshwater bodies and streams. These species typically comprise <3% of the total number of identified halobic indicators. In lakes of the eastern Bolshezemelskaya Tundra, as well as in the Ural water bodies, mesohalobes are rare, mostly with low abundance rates and a different composition. Species similar to those found in Lake Itkul include *Navicula kefvingensis*, *Navicymbula pusilla*, and *Halamphora perpusilla* (Stenina, 2009), as well as *Ctenophora pulchella*, and *Anomoeoneis sphaerophora* (Genkal and Eremkina, 2023). The phytoplankton of Lake Onega, similar to that of Lake Itkul, contains *Achnanthes biasolettianum*, *Navicymbula pusilla*, *Craticula halophila* var. *subcapitata*, *Rhopalodia gibberula*, and others (Chekryzheva, 2012).

For plankton communities of lakes and rivers associated with the Irtysh River in the Omsk Oblast, the following species are typical: *Tabularia tabulata*, *Ctenophora pulchella*, *Navicula kefvingensis*, *Nitzschia denticula*, *Surirella ovalis*, *Tryblionella apiculata*, and *Halamphora coffeiformis* (Phytoplankton..., 2019).

Navicula capitatoradiata, *Tryblionella hungarica*, etc., were observed among the indicators of high water mineralization in the benthic algal communities of the Oka River estuary (Khedairia et al., 2022). Single specimens of mesohalobic diatom species, including *Navicula capitatoradiata* and *Tabularia tabulata*, were found in the rivers of the Amur region (Medvedeva, 2023). Mesohalobic species *Ctenophora pulchella*, *Tabularia tabulata*, *Navicula capitatoradiata*, *Tryblionella hungarica*, *Nitzschia denticula*, etc., were recorded in lakes and rivers of the Kerzhensky Nature Reserve (Volga River basin) (Vodeneva et al., 2022).

In lakes of nearby regions, the species composition of mesohalobes shows greater similarity with Lake Itkul. For instance, *Navicula capitatoradiata*, *N. kefvingensis*, *Tabularia tabulata*, *Ctenophora pulchella*, *Prestauroneis protracta*, *Crenotia thermalis*, *Navicymbula pusilla*, *Halamphora coffeiformis*, *H. perpusilla*, *Nitzschia commutata*, *N. denticula*, and *Surirella ovalis* were detected in the plankton and bottom sediments of Lake

Teletskoye (Altai Republic) (Mitrofanova et al., 2007). Most mesohalobes species in Lake Itkul (85.7%) are common to freshwater lake ecosystems of Mongolia, especially to the bottom sediments of Lakes Buir and Achit (Dorofeyuk and Tsetsegmaa, 2002). In Lake Achit, a flowing body freshwater, the number of halophilic diatom species is 11%, and mesohalophilic ones are 4%, including *Mastogloia braunii*, *M. danseyi*, *M. smithii*, and *Anomoeoneis costata*, etc., which is not accidental, since the lake is located in an area of low-mountain desert steppes, and saline soils are located along the shores (Dorofeyuk, 1985). Meanwhile, in the freshwater lake Nogaan-Khol (Tuva Republic), only one species was found, namely *Ctenophora pulchella* (Naumenko and Nazyn, 2023), and in the large freshwater lake Azas in Tuva, mesohalobes were not found at all (Naumenko and Nazyn, 2024).

Mesohalobic diatoms were also identified in other freshwater lakes in the Shirinsky District of Khakassia. In particular, *Mastogloia danseyi*, *Anomoeoneis costata*, and *Nitzschia denticula* were detected in Lakes Chernoe and Fyrkal; *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula halophila*, *C. halophila* var. *subcapitata*, and *Navicymbula pusilla*—in Lake Chernoe; and *Navicula capitatoradiata*—in Lake Fyrkal (Popova, 1946). In Lake Tushinino (Tukhloe), situated near Lake Itkul, *Nitzschia denticula* was reported among the common species, while *Anomoeoneis sphaerophora* and *Craticula halophila* var. *subcapitata* were rarely and singly identified; *Navicula capitatoradiata*, *Mastogloia smithii*, and *Nitzschia denticula* were detected in Lake Orlovo (Popova, 1946).

Data on the ecology of some mesohalobic species are contradictory. Some algologists classify species such as *Navicymbula pusilla*, *Crenotia gibberula*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Navicula capitatoradiata*, *Halamphora perpusilla*, etc., as halophilic or indifferent to salinity (Stenina, 2009; Gorbulin, 2016; etc.).

The development of mesohalobic algae in Lake Itkul is most likely driven by a localized increase in water mineralization in the coastal region, which does not extend to the entire lake ecosystem. According to Savichev et al. (2015), Lake Itkul is characterized by intensive water exchange, which mitigates the effect of salt concentration in the lake waters during evaporation from the water body in June and July. Compared to Lake Shira, it experiences a shorter period of interaction between lake water and bottom sediments. Hence, the intensity of the water balance determines the differences in mineralization and chemical composition of the lake waters (Guseva and Savichev, 2016).

The influence of more mineralized groundwater is also possible, since in the steppe part of the Shirinsky District, it is characterized by increased mineralization (Pokrovskiy et al., 2001).

Natural causes of water salinization may include climate change combined with increased evaporation and low precipitation, as well as the lack or limitation of inflow or runoff (Zimmermann-Timm, 2007). In the studied case, we observe not only an increase in the annual temperatures of air and surface water of the lake but also a slight increase in annual precipitation. Any change in annual temperature fluctuations has a

significant impact on the thawing and freezing regimes of soils and rocks, thereby affecting the recharge conditions of surface and groundwater. With increasing temperature, the salt dissolution rate in natural solutions increases (Drovovozova and Kirilenko, 2021). Diatoms, in turn, respond to changes in salt concentration, even at chloride concentrations of only 100 mg per L (Zimmermann-Timm, 2007).

Long-term fluctuations in water levels cause changes in the habitats of biocenoses that vary in duration, since they are accompanied by alterations in the size of shallow waters, depth, mineralization, the number of phosphates from the catchment area, water heating conditions, and the duration of the growing season (Doganovsky, 2007). Perhaps this factor influences the changes in the composition of diatom groups associated with the water salinity of Lake Itkul. Following the period of maximum water level in 2021, according to the 2019–2025 hydrographic post data, in 2023, the number of halophobes increased by 8.9% in the lake epilithon, and the number of halophiles and mesohalobes decreased by 5.4 and 2.8%, respectively, when compared with the ecological spectra of this community between 2006 and 2009 (Makeeva and Mikhajlina, 2024). On the contrary, in 2024–2025, the number of halophilic organisms increased by 9.5–12.1%, and that of mesohalobes—by 1.1%, while the number of halophobic species decreased by 7.1–7.9%. Similar dynamics were observed in reed fouling in 2025. A significant number of halophilic and mesohalobotic species in the composition of salinity indicators may also be stipulated by the fact that the shore-forming soils are saline, which provides an increase in water mineralization upon the decrease in the water level.

5. Conclusion

Mesohalobotic diatom species were detected in phytoplankton, phytobenthos, and phytoperiphyton throughout Lake Itkul, but were typically concentrated along the western and southwestern shores of the lake where the number of abundant or frequently occurring species was small. Periphyton communities were the richest in mesohalobes. In some areas of the littoral zone, there were outbreaks of mesohalobotic growth in the epilithon and epiphyton, but these species had a low dominance frequency. The development of most salt-loving species was confined to late summer (August).

In the littoral zone of Lake Itkul, the algal community is more ecologically diverse, with greater numbers of mesohalobes, suggesting localized salinization of these areas. Discrepancies in diatom species composition in different habitats and seasonal changes in diatom assemblages indirectly indicate spatiotemporal diversity in diatom habitats in Lake Itkul.

The results of this study, aimed at identifying the habitats and occurrence of mesohalobotic species, can complement and expand our understanding of the floristic distribution patterns of these organisms and their halotolerance. Further detailed study of diatom development, including an analysis of their ecological

spectra depending on water level regimes and climate dynamics, will facilitate their successful use as accurate indicators of environmental change.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Algae: Reference Book. 1989. In: Vasser S.P. (Ed.). Kiev: Naukova Dumka. (in Russian)
- Arkhipova N.V., Makarenko N.A., Parnachev V.P. et al. 2014. Ecogeochemical features of soil and bottom sediments of the cluster area “Lake Itkul” in the state natural reserve “Khakassky”. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal] 386: 193–200. (in Russian)
- Barinova S. 2025. Database of Ecological Indicators of Freshwater Algae and Cyanobacteria. *Ecology and Diversity* 2 (2): 10003. DOI: [10.70322/ecoldivers.2025.10003](https://doi.org/10.70322/ecoldivers.2025.10003)
- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anissimova O.V. 2006. Diversity of algal indicators in environmental assessment. Tel-Aviv: PiliesStudio. (in Russian)
- Chekryzheva T.A. 2012. Taxonomic and ecological characteristics of phytoplankton in Lake Onega. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences] 1: 56–69. (in Russian)
- Devyatkin V.G., Mitropolskaya I.V. 2002. The occurrence of algal species as an indicator of biological diversity of algocenoses. In: Papchenkova V.G. (Ed.), *Dynamics of diversity of hydrobionts in the inland waters of Russia*. Yaroslavl: YSTU, pp. 5–22. (in Russian)
- Doganovsky A.M. 2007. The level regime of lakes is an integral indicator of climatic and environmental changes. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* (Terra Humana) [Society. Environment. Development (Terra Humana)] 1 (2): 103–110. (in Russian)
- Dorofeyuk N.I. 1985. Bacillariophyta depositus bentich lacus Aczit (Mongolia). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* [Novitates systematicae planetarium non vascularium] 22: 37–46. (in Russian)
- Dorofeyuk N.I., Tsetsegmaa D. 2002. Conspectus of Algae Flora of Mongolia. In: Ulziikhutag N., Gunin P.D. (Eds.). Moscow: Nauka. (in Russian)
- Drovovozova T.I., Kirilenko A.A. 2021. Meteorological factors impact on the quality of natural water facilities on the territory of the Bagaevskaya irrigation system. *Ekologiya i vodnoe khozyaistvo* [Ecology and Water Management] 3 (4): 1–13. DOI: [10.31774/2658-7890-2021-3-4-1-13](https://doi.org/10.31774/2658-7890-2021-3-4-1-13) (in Russian)
- Genkal S.I., Bondarenko N.A., Shchur L.A. 2011. Diatom algae of lakes in southern and northern Eastern Siberia. Rybinsk: Rybinskii Dom Pechati. (in Russian)
- Genkal S.I., Eremkina T.V. 2023. Diatom Algae of Different Types of Middle Ural Reservoirs (Sverdlovsk Region, Russia). *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology] 3: 291–300. DOI: [10.31857/S0320965223030087](https://doi.org/10.31857/S0320965223030087) (in Russian)
- Gorbunin O.S. 2016. Species diversity and autecology of Bacillariophyta of continental water bodies of Ukraine. *Fitoraznoobrazie Vostochnoi Evropy* [Phytodiversity of Eastern Europe] 10 (2): 33–95. (in Russian)
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (accessed: 26.03.2026).
- Guseva N.V., Savichev O.G. 2016. Hydrochemical balance of Itkul-Shira lake system (Khakassia, Russian Federation). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Siberian Journal of Ecology] 5: 718–728. DOI: [10.15372/SEJ20160509](https://doi.org/10.15372/SEJ20160509) (in Russian)

- Khedairia T., Okhapkin A.G., Genkal S.I. et al. 2022. Composition and Ecological Characteristics of Diatoms of Algae in the Benthos of the Mouth of a Large Eutrophic-Hypertrophic River (Oka River, Russia). *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology] 4: 372–380. DOI: [10.31857/S03209652204012X](https://doi.org/10.31857/S03209652204012X) (in Russian)
- Kopylova Yu.G., Dutova E.M., Vasiliev B.D. et al. 2005. Guide to natural waters of the training ground for geological practices in Northern Khakassia. Tomsk: TPU Publishing House. (in Russian)
- Makeeva E.G., Mikhajlina N.R. 2024. Taxonomic diversity of diatoms of the epilithon of Lake Itkul (Republic of Khakassia). *Problemy botaniki Yuzhnoi Sibiri i Mongolii* [Problems of botany of South Siberia and Mongolia] 23 (2): 227–230. DOI: [10.14258/pbssm.2024095](https://doi.org/10.14258/pbssm.2024095) (in Russian)
- Medvedeva L.A. 2023. Ecological and geographical characteristics of the diatom algal flora in the Zeya river basin (Amur region). *Botanicheskii zhurnal* [Botanical journal] 108 (6): 547–565. DOI: [10.31857/S0006813623060054](https://doi.org/10.31857/S0006813623060054) (in Russian)
- Mitrofanova E.Yu., Skabitchevskaya N.A., Kim G.V. et al. 2007. Diatom flora of Lake Teletskoye (Altai, Russia). *Novosti sistematiki nizshikh rastenii* [Novitates systematicae planetarium non vascularium] 41: 41–59. DOI: [10.31111/nsnr/2007.41.41](https://doi.org/10.31111/nsnr/2007.41.41) (in Russian)
- Natural waters of Shira District of the Republic of Khakassia. 2003. In: Parnachev V.P. (Ed.). Tomsk: Tomsk State University. (in Russian)
- Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D. 2023. Algae Mineral source Nogaan-Khol (Tyva, Russia). *Rastitel'nyi mir Aziatskoi Rossii* [Flora and Vegetation of Asian Russia] 16 (4): 342–348. DOI: [10.15372/RMAR20230404](https://doi.org/10.15372/RMAR20230404) (in Russian)
- Naumenko Yu.V., Nazyn Ch.D. 2024. Characteristics of algae in lake Azas (Republic of Tyva, Russia). *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Siberian Journal of Ecology] 4: 604–611. DOI: [10.15372/SEJ20240407](https://doi.org/10.15372/SEJ20240407) (in Russian)
- Nikolayeva Z.N., Nikolayev A.V. 2014. Atmospheric precipitation volume change peculiarities on the agricultural territory of the Republic of Khakassia. *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.F. Katanova* [Bulletin of the Katanov Khakass State University] 10: 43–45. (in Russian)
- Parnachev V.P., Degermendzhy A.G. 2002. Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakassia, Southern Siberia. *Aquatic Ecology* 36: 107–122. DOI: [10.1023/A:1015670130522](https://doi.org/10.1023/A:1015670130522)
- Pavlov P., Jovanovska J., Wetzel C.E. et al. 2016. Freshwater *Mastogloia* (Bacillariophyceae) taxa from Macedonia, with a description of the epizoic *M. stervjovskii* sp. nov. *Diatom Research* 31 (2): 85–112. DOI: [10.1080/0269249X.2016.1157376](https://doi.org/10.1080/0269249X.2016.1157376)
- Pestryakova L.A., Herzsuh U., Gorodnichev R. et al. 2018. The sensitivity of diatom taxa from Yakutian lakes (north-eastern Siberia) to electrical conductivity and other environmental variables. *Polar Research* 37: 1485625. DOI: [10.1080/17518369.2018.1485625](https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1485625)
- Pestryakova L.A., Sleptsova L.S. 2007. Diatomic flora of lakes of Yakutia. *Vestnik YaGU* [Bulletin of YSU] 4 (1): 17–22. (in Russian)
- Phytoplankton of the Omsk Priirtyshye: monograph. 2019. In: Bazhenova O.P. (Ed.). Omsk: Publishing House of the FSBEI of HE Omsk State Agrarian University. (in Russian)
- Pokrovskiy D.S., Dutova E.M., Bulatov A.A. et al. 2001. Groundwater in the Republic of Khakassia and water supply for the population. Tomsk: NTL Publ. (in Russian)
- Popova T.G. 1946. Algal flora of waters of the Northern Khakassia, Part 1: Algal flora of reservoirs of the Shira (Kachinskaya) steppe. *Izvestiya Zapadno-Sibirskogo filiala Akademii nauk SSSR. Seriya biologicheskaya* [News of the West-Siberian branch of the Academy of Sciences of USSR. Series Biology] 1 (2): 41–72. (in Russian)
- Pozdnyakov N.A. 2025. Analysis of climate change in the Republic of Khakassia. In: Actual problems of economic security and sustainable development of territories: regional and sectoral aspects: Proceedings of the interregional student scientific conference (Krasnoyarsk, November 20–21, 2024). Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University. pp.: 113–115. (in Russian) URL: <https://kgau.ru/science/konferentsii/content3/99.pdf> (accessed: 15.04.2026)
- Savichev O.G., Guseva N.V., Abdullaev B.D. 2015. Water balance of the Shira – Itkul lake system (Khakassia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tomsk State University Journal] 391: 214–219. DOI: [10.17223/15617793/391/34](https://doi.org/10.17223/15617793/391/34) (in Russian)
- Stenger-Kovács C., Béres V.B., Buczkó K. et al. 2023. Diatom community response to inland water salinization: a review. *Hydrobiologia* 850: 4627–4663. DOI: [10.1007/s10750-023-05167-w](https://doi.org/10.1007/s10750-023-05167-w)
- Stenina A.S. 2009. Diatoms (Bacillariophyta) in the lakes of the east of the Bolshezemelskaya tundra. Syktyvkar: Komi Research Centre of Ural Department of Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Tanzybaev M.G. 1993. Soils of Khakassia. Novosibirsk: Nauka Publ. (in Russian)
- Vodeneeva E.L., Kulizin P.V., Okhapkin A.G. 2022. Algae of the Kerzhensky Nature Reserve. Annotated List of Species. In: Korneva L.G. (Ed.), Flora and Fauna of Nature Reserves. Vol. 146. Moscow. (In Russian)
- Volobaev P.A. 1992. Supplements to the flora of hydrophilic plants in Siberia. *Botanicheskii zhurnal* [Botanical journal] 77(5): 62–70. (in Russian)
- Yarushina M.I., Tanaeva G.V., Eremkina T.V. 2004. Algae flora of water bodies of the Chelyabinsk region. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Zadereev E.S., Drobotov A.V., Tolomeev A.P. et al. 2021. The effect of salinity and nutrient load on the ecosystems of selected lakes in the south of Siberia. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* [Journal of Siberian Federal University. Biology] 14 (2): 133–153. DOI: [10.17516/1997-1389-0343](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0343) (in Russian)
- Ziemann H. 1997. The influence of different ion ratios on the biological effect of salinity in running waters of Thuringia (Germany) *Limnologica* 27: 19–28.
- Zimmermann-Timm H. 2007. Salinisation of inland waters. In: Lozán J.L., Grassl H., Hupfer P., Menzel L. & Schönwiese C.-D. (Eds.), Global Change: Enough water for all? Hamburg: Verlag Wissenschaftliche Auswertungen/GEO, pp. 133–136.

Мезогалобные виды диатомовых водорослей в пресном озере Иткуль (Хакасия, Россия)

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYМакеева Е.Г.^{1,2*}, Михайлина Н.Р.², Семенова В.В.²¹ Государственный природный биосферный заповедник «Хакасский», ул. Цукановой, 164, Абакан, 655017, Россия² Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, ул. Ленина, 90, Абакан, 655017, Россия

АННОТАЦИЯ. Приведен список видов мезогалобных диатомей, обнаруженных в пресном озере Иткуль за период 2006–2025 гг. Озеро расположено в степной зоне Республики Хакасия, Беле-Ширинской бессточной области. Определено 28 видовых и внутривидовых таксонов мезогалобных диатомей, принадлежащих к 17 родам. Как правило, мезогалобы в озере малочисленны и не играют существенной роли в альгоценозах, однако их разнообразие и интенсивность развития в перифитоне несколько больше, чем в других сообществах. Указаны сведения по частоте встречаемости каждого из таксонов. Наиболее активные виды в перифитоне по относительной частоте встречаемости: *Navicula capitatoradiata* H. Germain ex Gasse (до 90%), *Mastogloia danseyi* (Thwaites) Thwaites ex W. Smith (до 53,3%), *M. elliptica* (C. Agardh) Cleve (до 44,2%), *Nitzschia denticula* Grunow (до 69,8%). В 2024–2025 гг. наблюдали локальное массовое развитие *Navicula capitatoradiata*, *Mastogloia elliptica* в сообществах эпилимниона и эпилитона. Предполагается, что процентное соотношение групп галобности и развитие мезогалобных видов в озере зависят от понижения уровня воды в ответ на постепенный рост годовой температуры атмосферного воздуха и повышение температуры воды, а также от локального засоления прибрежных участков.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, мезогалобные виды, пресное озеро, Республика Хакасия

Для цитирования: Макеева Е.Г., Михайлина Н.Р., Семенова В.В. Мезогалобные виды диатомовых водорослей в пресном озере Иткуль (Хакасия, Россия) // Limnology and Freshwater Biology. 2026. - № 4. - С. 372-390. DOI: 10.31951/2658-3518-2026-A-4-372

1. Введение

Мезогалобы – обитатели солоноватых прибрежных вод морей и эстуариев, континентальных вод с соленостью от 5‰ до 20‰ (Барина и др., 2006). Представители этой группы редко доминируют в типичных пресных озерах, но встречаются там в качестве индикаторов локального повышения минерализации. Присутствие мезогалобных видов в диатомовых комплексах пресноводных экосистем Сибири отмечали многие исследователи (Попова, 1946; Митрофанова и др., 2007; Пестрякова и Слепцова, 2007; Генкал и др., 2011 и др.). Такие виды являются малочисленными и не играют существенной роли в альгоценозах.

Для некоторых пресных озер Хакасии (Южная Сибирь), расположенных в степной, засушливой зоне, также характерно наличие мезогалобных представителей диатомей в составе водорослевого

населения. Как правило, это спорадически встречаемые виды с низкой численностью. Однако в последние годы наблюдаются отдельные случаи их массового развития в эпилимниальных и эпилитных сообществах одного из крупных пресных озер Хакасии – оз. Иткуль.

Диатомовые водоросли обладают высоким потенциалом для индикации изменений в большинстве сред обитания, учитывая известные региональные взаимосвязи между ними и окружающей средой (Pestryakova et al., 2018). Одними из наиболее важных переменных, влияющих на состав диатомовых сообществ, являются общая минерализация и ионный состав воды, которые определяются различными природными факторами, в том числе типом коренных пород водосборного бассейна (Ziemann, 1997).

Оз. Иткуль имеет низкую минерализацию (по сравнению с другими озерами Ширинского района

*Автор для переписки. Адрес e-mail: meg77@yandex.ru (Е.Г. Макеева)

Поступила: 12 мая 2026;

Принята после доработки: 10 августа 2026;

Опубликована online: 28 августа 2026

© Автор(ы) 2026. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Хакасии), что объясняется расположением котловины озера преимущественно в карбонатных отложениях бейской свиты среднего девона, в то время как минерализованные водоемы, как правило, находятся в красноцветных отложениях верхнего девона и нижнего карбона (Архипова и др., 2014). В то же время в почвенном покрове озерной котловины, представленном в основном разновидностями обыкновенных и южных черноземов и луговых почв, встречаются солонцеватые и солончаковые почвы (Танзыбаев, 1993).

Известно, что изменение климата оказывает значительное влияние на уровень солености и процессы засоления ускорились, что подтверждается явными региональными и глобальными трендами, однако отдельные озера могут демонстрировать высокую изменчивость в своей реакции на изменение климата (Stenger-Kovács et al., 2023).

Для территории Хакасии установлено повышение среднегодовых температур (Поздняков, 2025) и количества осадков (Николаева и Николаев, 2014), что может приводить к изменению минерализации водоемов. Исследователи отмечают падение солености и рост уровня воды в некоторых озерах Ширинского района Республики Хакасия (Задереев и др., 2021). Сведения об увеличении или уменьшении минерализации воды оз. Иткуль отсутствуют. Не располагая ежегодными данными о минерализации озера трудно оценивать влияние данного фактора на водорослевое население. Однако мы имеем возможность наблюдать за изменением уровня воды озера (в 2019 г. по инициативе руководства заповедника на водоеме установлен гидропост), колебание которого оказывает воздействие на состав альгологических сообществ, соотношение экологических групп по отношению к разным факторам среды, в том числе к величине общей минерализации.

С одной стороны, мезогалообные водоросли – надежные индикаторы повышения солености, и их массовое развитие сигнализирует о перестройке экосистемы озера. Засоление может оказать существенное влияние на функции и услуги экосистемы в результате потери биоразнообразия, изменений в составе водных сообществ (доминирование солеустойчивых видов, распространение инвазивных видов) (Stenger-Kovács et al., 2023). Вместе с тем, мезогалообные виды – лишь небольшая часть разнообразного сообщества водорослей оз. Иткуль, которое включает 431 вид (466 видовых и внутривидовых таксонов). Для подтверждения влияния климатических изменений важно проанализировать сезонную и межгодовую динамику структурных и функциональных показателей всей альгофлоры озера и выявить факторы, определяющие степень их варьирования в водоеме. А оценка связей элементов биоценоза с уровневым режимом позволит оценить возможные тенденции изменения экосистемы в будущем при заданных изменениях климата и соответственно режима наполнения озера (Догановский, 2007).

Цель данной работы заключается в выявлении видового состава мезогалообных диатомовых

водорослей в пресном водоеме, особенностей их распространения и частоты встречаемости в различных биотопах озера.

2. Материалы и методы

2.1. Район исследований

Озеро Иткуль расположено в Чебаково-Балахтинской котловине Назаровско-Минусинской межгорной впадины, находится в пределах Беле-Ширинской бессточной области Июсо-Ширинской степи; в административном отношении – в Ширинском районе Республики Хакасия. Акватория оз. Иткуль заповедная (государственный заповедник «Хакаский») (Рис. 1). Климат Чебаково-Балахтинской котловины отличается резко выраженной континентальностью и аридностью, что способствует формированию на данной территории большого количества минерализованных озер (Parnachev and Degermendzhy, 2002).

Площадь водной поверхности оз. Иткуль – 23,25 км², максимальная глубина – 17 м, абсолютная отметка уреза воды – 456,2 м. В геологическом отношении котловина озера приурочена к крупной одноименной синклинальной структуре. В составе осадочных образований преобладают сероцветные известняки и мергели при подчиненном развитии известковых алевролитов и песчаников. Западный и юго-западный берега озера заболочены (низинные дернисто-осочковые и тростниковые болота). Там в него впадает р. Карыш, ручьи Харасуг (Карасук) и Шексуг (Шелсуг), вытекает небольшой руч. Тушининский (Природные воды..., 2003). Донные отложения оз. Иткуль в прибрежной зоне представлены щебнем, грубозернистым песком с галькой. На больших глубинах (более 3 м) преобладают тонкие илы.

Гидрологический режим озера подвержен периодическим колебаниям и зависит от величины стока впадающих рек и ручьев, количества атмосферных осадков и притока подземных и грунтовых вод в котловину (Архипова и др., 2014). Водоем представляет собой единую гидрохимическую систему с соленым оз. Шира, где выполняет роль проточного резервуара воды и растворенных в ней солей. Испарение оказывает значительно меньшее влияние на формирование гидрохимического баланса оз. Иткуль по сравнению с оз. Шира, наблюдается большая интенсивность водообмена в оз. Иткуль (Гусева и Савичев, 2016).

Воды озера гидрокарбонатные натриево-магниевого (Гусева и Савичев, 2016). Активная реакция среды 8,6–9,0. Минерализация воды в 1904 г. составляла 0,68 г/л; в 1989, 1995 гг. – 0,69 г/л (Природные воды..., 2003); в 2015 г. – 0,55 г/л, содержание гидрокарбонатов – 293 мг/л, карбонатов – 12,2 мг/л, сульфатов – 76,0 мг/л, хлоридов – 32,0 мг/л (Гусева и Савичев, 2016); в 2019 г. сухой остаток – 0,4 г/л, гидрокарбонаты – 231,8 мг/л, сульфаты – 67,2 мг/л, хлориды – 35,0 мг/л, карбонаты – 36,0 мг/л (Задереев и др., 2021).

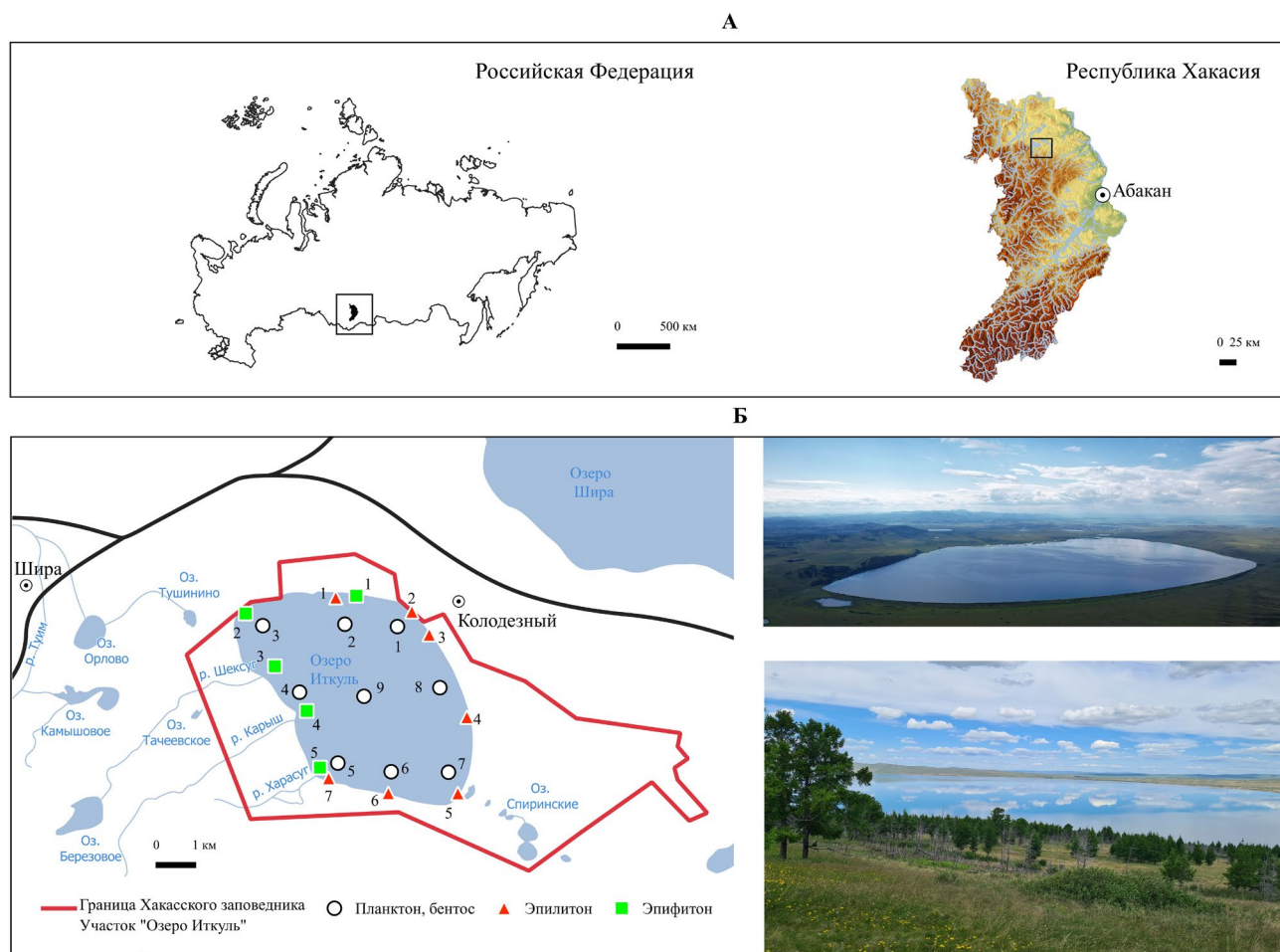


Рис.1. Географическое положение оз. Иткуль и станции отбора проб. А – Расположение озера на карте Российской Федерации и Республики Хакасия; Б – Станции отбора проб.

2.2. Отбор и анализ проб

Видовой состав планктонных, бентосных и перифитонных водорослей оз. Иткуль изучали с 2006 по 2009 гг. Далее – фитопланктон ежегодно, с 2023 г. по 2025 г. – эпилитные сообщества диатомей, в 2024–2025 гг. – диатомовый эпифитон тростника.

В 2006–2009 гг. пробы собирали на 9 станциях (Рис. 1), расположенных в центральной части озера и побережье. Планктонные водоросли собирали сетью Апштейна (мельничное сито с размером ячеек 64 мкм) и батометром Руттнера с поверхностного горизонта (0,5–1 м). Отбор бентосных водорослей осуществлялся с помощью лота или зачерпывания в склянку с разных глубин. Пробы фитозепифитона с *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud в 2003–2025 гг. были взяты на пяти станциях, расположенных вдоль северного, южного и западного берегов оз. Иткуль. Подводные части тростника (3–5 стеблей) срезали, затем счищали обрастания с помощью скальпеля в емкости. Пробы фитозепифитона в 2022–2025 гг. были собраны с 7 станций, расположенных вдоль северного, восточного, южного берегов озера на глубинах 0–1 м. Сбор обрастаний осуществляли путем соскоба налета с поверхности камней с помощью скальпеля или зубной щетки и смыва дистиллированной водой. На каждой станции брали по 10 камней, получая смешанную пробу. Пробы фиксировали 40% формальдегидом.

Для изготовления постоянных препаратов использовали метод сжигания проб смесью концентрированной серной кислоты и бихромата калия, в последние годы (2024–2025 гг.) – перекисью водорода, препараты готовили на среде Эльяшева. Определение проводили при помощи светового микроскопа «Olympus CX41», учитывая относительное обилие по шкале Стармаха (Водоросли..., 1989), выделяли доминантные и содоминантные виды (5 и 4 балла по шкале соответственно). Относительную частоту встречаемости (активности) таксонов рассчитывали в процентах от общего числа проб (Девяткин и Митропольская, 2002), для всех выявленных видов различных отделов водорослей и всех сообществ в 2006–2009 гг., в последующие периоды (2023–2025 гг.) только для диатомей, отдельно для эпилитона и эпифитона. Частота доминирования рассчитывалась как процент проб, в которых обилие вида составило 4 или 5 баллов к общему числу проб эпилитона или эпифитона.

Названия и систематическая принадлежность таксонов приведены согласно AlgaeBase (Guiry and Guiry, 2026); экологическая характеристика диатомей – базе данных экологических показателей пресноводных водорослей и цианобактерий (Barinova, 2025).

Графики межгодового распределения суммы осадков и средней температуры воздуха построены по данным Хакасского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – фили-

ала ФГБУ «Среднесибирское УГМС» (метеостанция Ши́ра), диаграммы уровня и температуры воды оз. Иткуль – согласно сведениям гидропоста на оз. Иткуль (период открытой воды).

3. Результаты

Диатомовые водоросли озера характеризуются высоким видовым богатством – 301 вид (324 видовых и внутривидовых таксона), относящихся к 3 классам, 14 порядкам, 30 семействам, 71 роду. Сообщество диатомей оз. Иткуль – преимущественно пресноводное, с большим вкладом солоноватоводных видов, реже встречаются мезогалофы и эвригалинные виды (Рис. 2).

По отношению к солености воды в озере преобладают индифференты (62,3% от общего числа видовых и внутривидовых таксонов) и галофилы – 12,3%. Галофобы составляют 8,95% от таксономического разнообразия диатомей; эвригалинные – 0,3% (*Operphora mutabilis* Sabbe & Wyverman). В озере обнаружено 27 видов (28 видовых и внутривидовых таксонов), относящихся к мезогалобам (8,6%):

Ctenophora pulchella (Kützinger) D.M. Williams & Round – в обрастаниях тростника, камней, в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9%).

Tabularia tabulata (C. Agardh) Snoeijs – в планктоне прибрежья, в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9%).

Anomoeoneis costata (Kützinger) Hustedt – в обрастаниях тростника, сентябрь 2025 г., (встречаемость 0,9%). Возможно, вид принесен птицами во время осенней миграции, с рядом расположенного оз. Ши́ра.

Anomoeoneis sphaerophora Pfitzer – в планктоне прибрежья, в иле на середине озера, в 2006–2009 гг. (встречаемость 1,8%). В 2025 г. встретился в районе впадения р. Карыш, западный берег на тростнике, август (встречаемость 2,3% с июня по сентябрь).

Gomphonema salinarum (Pantosek) Cleve – в обрастаниях камней, в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9%), юго-западная часть озера.

Navicymbula pusilla (Grunow) Krammer – в планктоне прибрежья и иле (западный берег), в 2006–2009 гг. (встречаемость 2,8%).

Navicula capitatoradiata H. Germain ex Gasse – наиболее распространенный вид, встречен во всех сообществах, кроме грунтов с примесью глины и обрастаний хары войлочной. В 2006–2009 гг. встречаемость 16,5% для всех сообществ, в перифитоне – 49,0%. В 2024–2025 гг. встречаемость в эпицитоне – 47,5–86,6%; в эпицитоне с июня по сентябрь – 50–62,8%, в августе 2025 г. – 90,0%. В 2024 г. содоминировал в районе восточного берега озера в сентябре в эпицитоне, в июле – доминировал в эпицитоне тростника, западный берег. В период с мая по сентябрь встречался по всей акватории.

Navicula kefvingensis (Ehrenberg) Kützinger – в иле западного берега, в обрастаниях рдеста гребенчатого, в 2006–2009 гг. (встречаемость 1,8%).

Prestauroneis crucicula (W. Smith) Genkal & Yarushina – ил, середина озера, на песчаном грунте,

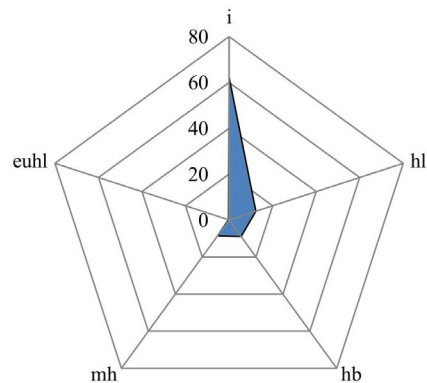


Рис.2. Распределение диатомовых водорослей – индикаторов солености воды в оз. Иткуль, % (i – индифференты, hl – галофилы, hb – галофобы, mh – мезогалофы, euhl – эвригалинные).

в планктоне прибрежья, в 2006–2009 гг. (встречаемость 1,8%); в 2025 г. в перифитоне тростника в июле (встречаемость с июня по сентябрь 2,3%).

Prestauroneis protracta (Grunow) Kulikovskiy & Glushchenko – на песчано-илистом грунте в 2006 г. (встречаемость 0,9%). В 2025 г. в обрастаниях камней в июле (встречаемость 2,5%), на восточном берегу озера.

Craticula halophila (Grunow) D.G. Mann – в планктоне прибрежья, на камнях, в обрастаниях рдеста гребенчатого, рдеста блестящего, хары войлочной в 2006–2009 гг. (встречаемость 1,8%), в 2025 г. в эпицитоне, август (встречаемость 2,5%), в перифитоне тростника (встречаемость 9,3% с июня по сентябрь, наиболее активен в августе – 20%).

Craticula halophila var. *subcapitata* (Østrup) Czarnecki – в обрастаниях тростника и хары войлочной в 2006–2009 гг. (встречаемость 1,8%).

Mastogloia braunii Grunow – в планктоне прибрежья, в обрастаниях тростника и горца земноводного, камней, в 2006–2009 гг. (встречаемость 5,5% для всех сообществ). В 2023–2025 гг. в эпицитоне южного берега (встречаемость за весь период исследований с мая по сентябрь – 7,7%, в августе 14,3–28,6%).

Mastogloia danseyi (Thwaites) Thwaites ex W. Smith – в 2006–2009 гг. в планктоне прибрежья, иле западного берега, на песчано-илистом грунте, тростнике, рдесте блестящем, харе, камнях (встречаемость 16,5% для всех сообществ). В эпицитоне 2023 г. – 7,7%; 2024 г. – 53,3%; в 2025 г. – 30%. Вид наиболее активен в августе, в районе южного берега озера. Встречаемость в эпицитоне тростника – 34,9%, также более активен в августе.

Mastogloia elliptica (C. Agardh) Cleve – в планктоне прибрежья, иле с середины озера, на песчаном, песчано-галечниковом грунте, тростнике, камнях, в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9% для всех сообществ). В эпицитоне 2023 г. встречаемость вида – 23,1%, 2024 г. – 26,6%, 2025 г. – 25,0%, во все последние годы, большая активность вида отмечена в августе, в 2025 г. вид доминировал в августе в районе южного берега. В эпицитоне тростника в 2024–2025 гг. вид встречен в 41,7–44,2% проб, большая активность вида характерна для августа.

Mastogloia smithii Thwaites ex W. Smith – встречен во всех сообществах, кроме ила с середины озера, грунтов с примесью глины и песка. Ранее в 2006–2009 гг. встречаемость во всех сообществах составляла 31,2%, в планктоне – 18,0–28,0%. В 2023–2025 гг. в эпилимнотоне вид встречался в 7,7–22,5% проб, большая активность вида отмечалась в августе.

Achnanthes biasolettianum (Grunow) Lange-Bertalot – в 2006–2009 гг. в эпилимнотоне (встречаемость 0,9%).

Crenothrix gibberula (Grunow) Wojtal – ранее, в 2006–2009 гг. – планктон прибрежья, ил западного берега, в обрастаниях камней, макрофитов (встречаемость 1,9%).

Crenothrix thermalis (Rabenhorst) Wojtal – только в планктоне прибрежья в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9%).

Halophora coffeiformis (C. Agardh) Mereschowsky – в планктоне прибрежья, иле с середины озера, на рдесте гребенчатом в западной части озера в 2006–2009 гг. (встречаемость 24,6%). В последние годы в планктоне и обрастаниях камней и тростника вид не обнаружен.

Halophora perpusilla (Grunow) Q.-M. You & Kociolek встречена только в грунтах в 2006–2009 гг.: в иле с середины озера, песчано-илистом, песчано-галечниковом грунтах (встречаемость 7,3%). В период с 2010 по 2025 гг. не изучали состав бентоса.

Amphora affinis Kützinger – на тростнике в июле 2024 г., западный берег (встречаемость 8,33%).

Rhopalodia gibberula (Ehrenberg) O. Müller – в 2006–2009 гг. в планктоне и иле прибрежья, в обрастаниях (встречаемость 18,3%). В последние годы – периодически с мая по сентябрь в эпилимнотоне, единично. Встречаемость в 2023 г. – 7,7%, в 2024 г. – 26,6%, в 2025 – 2,5%.

Nitzschia commutata Grunow – только на песчаном грунте, единично в 2006–2009 гг. (встречаемость 0,9%).

Nitzschia denticula Grunow – в 2006–2009 гг. в планктоне прибрежья, на песке, камнях, песчано-илистом грунте, тростнике, рдестах, харе (встречаемость 11,9%). Встречаемость в эпилимнотоне 2023 г. – 7,7%, в 2024 г. – 13,3%, в 2025 г. – 25,0%. В эпилимнотоне тростника 2024–2025 гг. встречаемость 50,0–69,8%, вид более активен в августе.

Tryblionella apiculata W. Gregory – на тростнике, в 2025 г. в августе-сентябре, встречаемость 10,0–11,1%.

Tryblionella hungarica (Grunow) Frenguelli – в 2006–2009 гг. на песчано-галечниковом грунте (встречаемость 0,9%).

Surirella ovalis Brébisson – в 2006–2009 гг. на тростнике в западной части озера (встречаемость 0,9%), в последние годы также на тростнике (встречаемость 2,3%).

Виды, зарегистрированные в планктоне, в основном характерны для проб, собранных сетью Апштейна. В количественных пробах обнаружены лишь *Navicula capitatoradiata* с численностью 0,5–1,63 тыс. кл./л и *Crenothrix gibberula* (0,2–0,5 тыс.

кл./л). Большая часть мезогалофитных видов обнаружена в бентосе и перифитоне.

Важнейшая природная особенность озер степной зоны Хакасии – это цикличность колебаний уровней воды, обусловленная изменчивостью общей увлажненности. Количество атмосферных осадков оказывает прямое и существенное влияние на динамику минерализации озер. Увеличение осадков обычно приводит к снижению минерализации за счет разбавления воды, тогда как их дефицит повышает концентрацию солей, особенно в бессточных водоемах. Распределение годовых сумм осадков (по данным метеостанции Ширы) показано на Рис. 3 А. За последний десятилетний период (2016–2025 гг.) характерен рост годового количества осадков, который составил 44,9 мм по сравнению с периодом 2006–2015 гг.

Возможная причина развития мезогалофитных видов водорослей – постепенный рост годовой температуры атмосферного воздуха. Указанный фактор влияет на протекание физико-химических процессов и в целом отражается на химическом составе природных вод (Дровозова и Кириленко, 2021). Анализ данных многолетних наблюдений на метеостанции Ширы показывает рост среднегодовой температуры воздуха за последние 20 лет (Рис. 3 Б). С 2022 по 2025 гг. отмечается снижение уровня и рост температуры воды оз. Иткуль (Рис. 3 В, Г).

Потенциально, повышение температуры воздуха приводит к усилению испарения (особенно на мелководьях), в результате возможно локальное засоление, отражающееся на составе эпилимнитных и эпифитных сообществ. Кроме того, при повышении количества осадков, вероятно выщелачивание солей из засоленных почв береговой зоны, в результате чего может увеличиваться поступление солей в озеро с поверхностным стоком.

4. Обсуждение

В период наблюдения с 1934 г. по 2025 г. видовой состав и степень развития мезогалофитных видов в озере претерпели некоторые изменения. Все виды, обнаруженные в 1934 г. при обследовании оз. Иткуль Т.Г. Поповой (1946), встречены нами в пробах 2006–2009 гг.: *Ctenophora pulchella*, *Achnanthes biasolettianum*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Prestauroneis crucicula*, *P. protracta*, *Craticula halophila*, *C. halophila* var. *subcapitata*, *Navicymbula pusilla*, *Nitzschia denticula*, *Tryblionella hungarica*, однако из рода *Mastogloia* в списке видов приводился только галофил *M. lacustris* (Grunow) Grunow (в настоящее время доминант в перифитоне, с высокой частотой встречаемости). К 2025 г. в озере выявлено 6 видов рода *Mastogloia*, среди которых характерные представители мезогалофитного комплекса озера: *M. braunii*, *M. danseyi*, *M. elliptica*, *M. smithii*. Кроме вышеперечисленных видов, на протяжении периода исследования с 2006 г. в пробах присутствовали: *Navicula capitatoradiata*, *Nitzschia denticula*, *Rhopalodia gibberula*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula halophila*, *Prestauroneis crucicula*, *P. protracta*, *Surirella ovalis*.

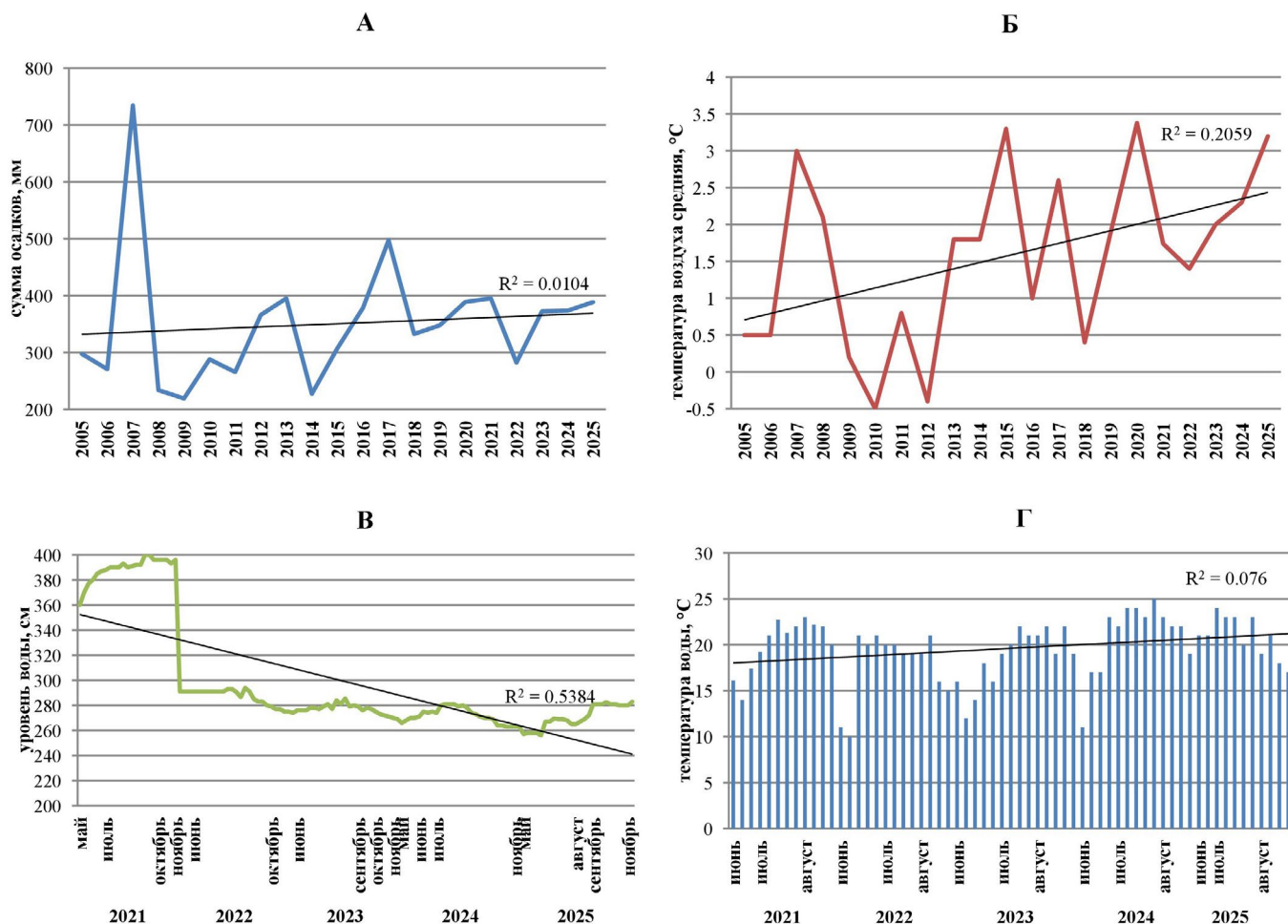


Рис.3. Погодные условия района исследования и гидрологические характеристики оз. Иткуль. А – изменение годовых сумм осадков (по данным метеостанции Шира); Б – изменение среднегодовой температуры воздуха (по данным метеостанции Шира); В – уровень воды оз. Иткуль; Г – температура воды оз. Иткуль.

Часть видов, выявленных в 2006–2009 гг., в последние годы не обнаружена, возможно, из-за отсутствия бентосных проб. Среди них *Halamphora perpusilla*, *H. coffeiformis*, *Tabularia tabulata*, *Gomphonema salinarum* и др.

В 2024–2025 гг. в эпилитоне тростника появились новые для озера виды, малоактивные: *Anomoeoneis costata*, *Amphora affinis*, *Tryblionella apiculata*.

Рассмотрим распределение мезогалобных диатомей в водорослевых сообществах. В планктоне озера выявлено 15 видовых и внутривидовых таксонов мезогалобов, относящихся к родам *Tabularia*, *Mastogloia*, *Navicymbula*, *Crenotia*, *Craticula*, *Halamphora*, *Rhopalodia*, они встречались спорадически, не каждый год, в единичном количестве.

В донных грунтах присутствовало 18 мезогалобных видов. Большинство из них обнаружено в иле вдоль западного берега: *Navicymbula pusilla*, *Navicula kefvingensis*, *Mastogloia danseyi*, *M. smithii* и др., в иле центральной части озера: *Anomoeoneis sphaerophora*, *Prestauroneis crucicula*, *Halamphora coffeiformis* и др. Как правило, они имели низкую частоту встречаемости в структуре бентосных ценозов – до 2,7%, кроме *Mastogloia danseyi* – 27,7%, *M. smithii* – 25,0%, *Navicula capitatoradiata*, *Halamphora perpusilla* – 22,0%.

Разнообразие и интенсивность развития мезогалобных диатомей в перифитоне несколько

больше, чем в других сообществах: здесь обнаружено 23 видовых и внутривидовых таксона, в последнее время наблюдалось массовое развитие видов *Mastogloia elliptica* (в 2025 г. вид доминировал в обрастаниях камней, станция 7) и *Navicula capitatoradiata* (в 2024 г. вид содоминировал в эпилитоне на станции 3 в сентябре и доминировал в эпилитоне на станции 3 в июле). Доминирование данных видов локализовано в определенных участках водоема. Частота доминирования в эпилитоне *Navicula capitatoradiata* – 7,7%; в эпилитоне – 6,7%; *Mastogloia elliptica* в эпилитоне – 2,5%. В августе 2025 гг. наблюдалась достаточно высокая встречаемость в эпилитных и эпилитных сообществах видов *Navicula capitatoradiata* (90,0% эпилитон), *Nitzschia denticula* (80,0% эпилитон), *Mastogloia danseyi* (55,6% эпилитон), *M. smithii* (71,4% эпилитон), *M. elliptica* (70,0% эпилитон, 57,1% эпилитон).

Что касается пространственного распределения, то более высокое разнообразие мезогалобных форм в перифитоне тростника характерно для средней части западного берега озера (станции 3, 4), 7 видов зарегистрировано на каждой из этих станций (*Mastogloia danseyi*, *M. elliptica*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Prestauroneis crucicula*, *Navicula capitatoradiata*, *Nitzschia denticula*, *Tryblionella apiculata*); в эпилитоне – для южного и юго-западного берегов (станции 6 и 7), также 7 видов

(*Navicula capitatoradiata*, *Mastogloia braunii*, *M. danseyi*, *M. elliptica*, *M. smithii*, *Rhopalodia gibberula*, *Nitzschia denticula*). Во временной динамике пик их видового разнообразия и количественного развития приходился на август 2025 г.

Т.Г. Попова (1946) характеризовала флору оз. Иткуль как пресноводно-солонowodную, с преобладанием в планктоне и бентосе индифферентных и эвригалинных видов, с единичным внедрением галофилов или мезогалобов, отмечала богатство галофилами западного берега, где в устье некоторых водотоков, они находили себе обильное развитие. Наши исследования подтверждают данные замечания. Кроме развития вдоль заболоченного западного берега галофильных и мезогалобных форм диатомовых водорослей, на данном участке водоема обращает внимание малое количество десмидиевых водорослей, основная часть которых предпочитает воды с низким содержанием солей. О повышенной минерализации воды в некоторых прибрежных участках озера также могут свидетельствовать находки галофильных макрофитов, так, П.А. Волобаев (1992) указывал на довольно странный факт нахождения *Ruppia maritima* L. в оз. Иткуль, поскольку вид является облигатным галофитом.

Интересно обнаружение мезогалобов в обрастании тростника в районе впадения р. Карыш, данных о высокой засоленности самой реки нет, минерализация вод 357–446 мг/л (Копылова и др., 2005). Однако в бентосе одного из водотоков, связанных с оз. Иткуль, Т.Г. Попова (1946) отмечала наряду с чисто пресноводными формами, галофилов и мезогалобов, свидетельствующих о значительном засолении ила.

Представители рода *Mastogloia* – одни из часто встречаемых диатомовых водорослей в оз. Иткуль. Большинство таксонов этого рода обитают в морской среде, и лишь небольшое их количество встречается в пресноводных экосистемах. В основном в качестве субстратов они предпочитают погруженные растения, камни, а также донные отложения; развиваются в самых разнообразных пресноводных местообитаниях: ручьях и реках, озерах, прудах, сфагновых болотах и др. Характерные для оз. Иткуль виды *Mastogloia danseyi*, *M. elliptica* обнаружены в значительном количестве в болотах, небольших реках, минеральных источниках Македонии среди обитателей эпифитона и эпилитона (Pavlov et al., 2016). В пресных озерах Челябинской области развивались *Mastogloia braunii*, *M. elliptica*, *M. smithii* (Ярушина и др., 2004).

Наличие мезогалобных диатомей во флорах пресноводных водоемов и водотоков отмечают многие исследователи. Как правило, данные виды составляют не более 3% от общего числа выявленных индикаторов галобности. В озерах востока Большеземельской тундры, а также в Уральских водохранилищах, мезогалобы встречаются редко, в большинстве с низкими оценками обилия, имеют иной состав, из схожих с оз. Иткуль видов – *Navicula kefvingsensis*, *Navicymbula pusilla*, *Halamphora perpusilla* (Стенина, 2009); *Ctenophora pulchella*, *Anomoeoneis*

sphaerophora (Генкал и Еремкина, 2023). В фитопланктоне Онежского озера, как и в оз. Иткуль, развиваются *Achnanthyidium biasoletianum*, *Navicymbula pusilla*, *Craticula halophila* var. *subcapitata*, *Rhopalodia gibberula* и др. (Чекрыжева, 2012).

Для планктонных сообществ озер и рек Омского Прииртышья известны *Tabularia tabulata*, *Ctenophora pulchella*, *Navicula kefvingsensis*, *Nitzschia denticula*, *Surirella ovalis*, *Tryblionella apiculata*, *Halamphora coffeiformis* (Фитопланктон..., 2019).

В альгоценозах бентали устья р. Оки среди показателей повышенных значений минерализации вод отмечали *Navicula capitatoradiata*, *Tryblionella hungarica* и др. (Хедаири и др., 2022). Мезогалобные виды обнаружены единичными экземплярами в реках Амурской области, среди них *Navicula capitatoradiata*, *Tabularia tabulata* (Медведева, 2023).

В озерах и реках Керженского заповедника (бассейн р. Волга) зарегистрированы мезогалобные виды: *Ctenophora pulchella*, *Tabularia tabulata*, *Navicula capitatoradiata*, *Tryblionella hungarica*, *Nitzschia denticula* и др. (Воденеева и др., 2022).

В озерах близлежащих регионов видовой состав мезогалобов проявляет большее сходство с оз. Иткуль. Так, в планктоне и донных отложениях оз. Телецкое (Республика Алтай) обнаружены *Navicula capitatoradiata*, *N. kefvingsensis*, *Tabularia tabulata*, *Ctenophora pulchella*, *Prestauroneis protracta*, *Crenotia thermalis*, *Navicymbula pusilla*, *Halamphora coffeiformis*, *H. perpusilla*, *Nitzschia commutata*, *N. denticula*, *Surirella ovalis* (Митрофанова и др., 2007). Большинство мезогалобных видов оз. Иткуль (85,7 %) характерно для пресных озерных экосистем Монголии, особенно для донных осадков озер Буйр и Ачит (Дорофеюк и Цэцэгмаа, 2002). В пресноводном проточном водоеме – оз. Ачит, количество галофильных видов диатомовых равно 11%, а мезогалобных – 4%, среди них *Mastogloia braunii*, *M. danseyi*, *M. smithii*, *Anomoeoneis costata* и др., неслучайно, т.к. озеро находится в районе низкогорных пустынных степей и по берегам расположены засоленные почвы (Дорофеюк, 1985). В пресном оз. Ногаан-Холь (Республика Тыва) отмечен только один вид – *Ctenophora pulchella* (Науменко и Назын, 2023). В то время как в крупном пресном озере Тывы Азас, мезогалобы не обнаружены (Науменко и Назын, 2024).

Мезогалобные диатомовые водоросли находили также и в других пресных озерах Ширинского района Хакасии: *Mastogloia danseyi*, *Anomoeoneis costata*, *Nitzschia denticula* – в озерах Черное и Фыркал; *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula halophila*, *C. halophila* var. *subcapitata*, *Navicymbula pusilla* – оз. Черное; *Navicula capitatoradiata* – оз. Фыркал, (Попова, 1946). В расположенных рядом с Иткулем оз. Тушинино (Тухлое) – *Nitzschia denticula* указывалась среди обычных видов, редко и единично встречались *Anomoeoneis sphaerophora*, *Craticula halophila* var. *subcapitata*; в оз. Орлово – *Navicula capitatoradiata*, *Mastogloia smithii*, *Nitzschia denticula* (Попова, 1946).

Данные относительно экологии некоторых мезогалобных видов противоречивы. Часть из них

(*Navicymbula pusilla*, *Crenotia gibberula*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Navicula capitatoradiata*, *Halamphora perpusilla* и др.) некоторыми альгологами рассматривается как галофильные или индифферентные по отношению к солености (Стенина, 2009; Горбулин, 2016 и др.).

Причиной развития мезогалобных видов водорослей в оз. Иткуль скорее всего является локальное повышение минерализации воды в прибрежье, которое не распространяется на всю озерную экосистему. По данным О.Г. Савичева и др. (2015) оз. Иткуль характеризуется интенсивным водообменом, сглаживающим эффект концентрирования солей в озерных водах в процессе испарения воды с акватории в июне-июле. По сравнению с оз. Шира, здесь наблюдается меньшее время взаимодействия озерных вод с донными отложениями, в итоге интенсивность водного баланса определяет различия озерных вод по минерализации и химическому составу (Гусева и Савичев, 2016).

Возможно влияние более минерализованных подземных вод, т.к. в степной части Ширинского района они характеризуются повышенной минерализацией (Покровский и др., 2001).

Природными причинами засоления вод могут быть изменение климата в сочетании с повышенным испарением и низким уровнем осадков; отсутствие или ограничение притока или стока (Zimmermann-Timm, 2007). В нашем случае мы наблюдаем увеличение годовой температуры воздуха и поверхностных вод озера, но при этом некоторое увеличение годового количества осадков. Любое изменение годовых колебаний температуры оказывает значительное влияние на оттаивание и промерзание почв и пород, тем самым сказываясь на условиях питания поверхностных и грунтовых вод; с повышением температуры возрастает скорость растворения солей, присутствующих в природных растворах (Дровозова и Кириленко, 2021). В свою очередь, диатомовые реагируют на изменения концентрации соли, даже при концентрации хлоридов всего 100 мг на литр (Zimmermann-Timm, 2007).

Многолетние колебания уровней формируют разнопериодные изменения среды обитания биоценозов, меняются размеры мелководий, глубины, минерализация, количество фосфатов с водосбора, условия прогревания воды, продолжительность вегетационного периода (Догановский, 2007). Возможно, данный фактор влияет на изменение состава групп диатомовых водорослей по отношению к солености воды в оз. Иткуль. После периода максимального уровня воды в 2021 г. (по данным гидропоста 2019–2025 гг.), в эпилимнотоне озера в 2023 г. мы наблюдали увеличение числа галофобов на 8,9%, уменьшение числа галофилов и мезогалобов на 5,4 и 2,8% (соответственно) при сравнении с экологическими спектрами данного сообщества в 2006–2009 гг. (Макеева и Михайлина, 2024). В 2024–2025 гг., напротив, увеличилось число галофильных организмов (на 9,5–12,1%) и мезогалобов (на 1,1%); сократилось число галофобных видов (на 7,1–7,9%). В обрастающих тростника в 2025 г. прослеживалась сходная динамика.

Присутствие в составе индикаторов солености значительного числа галофильных и мезогалобных видов, возможно, также обусловлено тем, что почвы, формирующие берега, засолены, что способствовало повышению минерализации воды во время снижения уровня воды.

5. Заключение

Мезогалобные виды диатомовых водорослей встречались в фитопланктоне, фитобентосе и фитоперифитоне, по всей акватории оз. Иткуль, но, как правило, сосредоточены вдоль западного и юго-западного берегов озера, отмечено небольшое число массовых или часто встречающихся видов.

Наиболее богаты мезогалобами перифитонные сообщества. На отдельных участках литорали в эпилимнотоне и эпифитоне наблюдались вспышки развития мезогалобов, однако данные виды имели низкую частоту доминирования. Развитие большинства соелюбивых видов приурочено к концу лета (август).

В прибрежной зоне оз. Иткуль водорослевое население более пестрое в экологическом отношении, мезогалобы встречаются здесь в большем количестве, что говорит о локальном засолении прибрежных участков.

Различия в видовом составе диатомей в разных местообитаниях и сезонные изменения в группировках диатомовых водорослей косвенно свидетельствуют о пространственно-временном разнообразии условий обитания диатомовых водорослей в оз. Иткуль.

Результаты настоящего исследования, направленного на выявление мест обитания и встречаемости мезогалобных видов, могут дополнять и расширять сведения о закономерностях флористического распределения данных организмов и их галотолерантности.

Дальнейшее детальное изучение развития диатомовых водорослей с учетом анализа их экологических спектров во взаимосвязи с уровнем режимом и динамикой климатических факторов будет способствовать их успешному использованию в качестве точных индикаторов изменения состояния окружающей среды.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Архипова Н.В., Макаренко Н.А., Парначев В.П. и др. 2014. Экогеохимические особенности почвенного покрова и донных отложений кластерного участка «Озеро Иткуль» Государственного природного заповедника «Хакасский». Вестник Томского государственного университета 386: 193–200.
- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей – индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio.

- Воденеева Е.Л., Куликин П.В., Охупкин А.Г. 2022. Водоросли Керженского заповедника (аннотированный список видов). В: Корнева Л.Г. (ред.), Флора и фауна заповедников. Вып. 146. Москва.
- Водоросли. Справочник. 1989. В: Вассер С.П. (отв. ред.). Киев: Наукова думка.
- Волобаев П.А. 1992. Дополнение к флоре гидрофильных растений Сибири. Ботанический журнал 77 (5): 62–70.
- Генкал С.И., Бондаренко Н.А., Щур Л.А. 2011. Диатомовые водоросли озер юга и севера Восточной Сибири. В: Девяткин В.Г. (отв. ред.). Рыбинск: ОАО «Рыбинский дом печати».
- Генкал С.И., Еремкина Т.В. 2023. Диатомовые водоросли разнотипных Уральских водохранилищ (Свердловская обл.). Биология внутренних вод 3: 291–300. DOI: [10.31857/S0320965223030087](https://doi.org/10.31857/S0320965223030087)
- Горбулин О.С. 2016. Видовой состав и аутоэкология Bacillariophyta континентальных водоемов Украины. Фиторазнообразие Восточной Европы 10 (2): 33–95.
- Гусева Н.В., Савичев О.Г. 2016. Гидрохимический баланс системы озер Иткуль-Шира (Хакасия, Российская Федерация). Сибирский экологический журнал 5: 718–728. DOI: [10.15372/SEJ20160509](https://doi.org/10.15372/SEJ20160509)
- Девяткин В.Г., Митропольская И.В. 2002. Встречаемость видов водорослей как показатель биологического разнообразия альгоценозов. В: Папченков В.Г. (ред.), Динамика разнообразия гидробионтов во внутренних водоемах России. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, С. 5–22.
- Догановский А.М. 2007. Уровенный режим озер – интегральный показатель климатических и экологических изменений. Общество. Среда. Развитие (Тегга Humana) 1 (2): 103–110.
- Дорофеюк Н.И. 1985. Диатомовые водоросли донных осадков озера Ачит (МНР). Новости систематики низших растений 22: 37–46.
- Дорофеюк Н.И., Цэцэгмаа Д. 2002. Конспект флоры водорослей Монголии. В: Улзийхутаг Н., Гунин П.Д. (ред.). М.: Наука.
- Дрововозова Т.И., Кириленко А.А. 2021. Влияние метеорологических факторов на качество природных водных объектов на территории Багаевской оросительной системы. Экология и водное хозяйство 3 (4): 1–13. DOI: [10.31774/2658-7890-2021-3-4-1-13](https://doi.org/10.31774/2658-7890-2021-3-4-1-13)
- Задереев Е.С., Дроботов А.В., Толмеев А.П. и др. 2021. Влияние солёности и биогенной нагрузки на экосистемы ряда озер юга Сибири. Журнал Сибирского федерального университета. Биология 14 (2): 133–153. DOI: [10.17516/1997-1389-0343](https://doi.org/10.17516/1997-1389-0343)
- Копылова Ю.Г., Дутова Е.М., Васильев Б.Д. и др. 2005. Путеводитель по природным водам полигона учебных геологических практик в Северной Хакасии. Томск: Изд-во ТПУ.
- Макеева Е.Г., Михайлина Н.Р. 2024. Таксономическое разнообразие диатомовых водорослей эпиплтона оз. Иткуль (Республика Хакасия). Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии 23 (2): 227–230. DOI: [10.14258/pbssm.2024095](https://doi.org/10.14258/pbssm.2024095)
- Медведева Л.А. 2023. Эколого-географическая характеристика флоры диатомовых водорослей бассейна реки Зея (Амурская область). Ботанический журнал том 108 (6): 547–565. DOI: [10.31857/S0006813623060054](https://doi.org/10.31857/S0006813623060054)
- Митрофанова Е.Ю., Скабичевская Н.А., Ким Г.В. и др. 2007. Флора диатомовых водорослей Телецкого озера (Алтай, Россия). Новости систематики низших растений 41: 41–59. DOI: [10.31111/nsnr/2007.41.41](https://doi.org/10.31111/nsnr/2007.41.41)
- Науменко Ю.В., Назын Ч.Д. 2023. Водоросли озера Ногаан-Холь (Тыва, Россия). Растительный мир Азиатской России 16 (4): 342–348. DOI: [10.15372/RMAR20230404](https://doi.org/10.15372/RMAR20230404)
- Науменко Ю.В., Назын Ч.Д. 2024. Характеристика водорослей озера Азас (Республика Тыва, Россия). Сибирский экологический журнал 4: 604–611.
- Николаева З.Н., Николаев А.В. 2014. Особенности изменения количества атмосферных осадков на земельно-сельскохозяйственной территории Республики Хакасия. Вестник Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова 10: 43–45.
- Пестрякова Л.А., Слепцова Л.С. 2007. Диатомовая флора озер Якутии. Вестник ЯГУ 4 (1): 17–22.
- Поздняков Н.А. 2025. Анализ климатических изменений в Республике Хакасия. В: Актуальные проблемы экономической безопасности и устойчивого развития территорий: региональный и отраслевой аспекты: материалы межрегиональной студенческой научной конференции 20–21 ноября 2024 года. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, С. 113–115. URL: <https://kgau.ru/science/konferentsii/content3/99.pdf> (дата обращения: 15.04.2026)
- Покровский Д.С., Дутова Е.М., Булатов А.А. и др. 2001. Подземные воды Республики Хакасия и водоснабжение населения. В: Покровский Д.С. (ред.). Томск: Изд-во НТЛ.
- Попова Т.Г. 1946. К познанию альгофлоры водоемов Северной Хакасии. Ч. I. Альгофлора водоемов Ширинской (Качинской) степи. Известия Западно-Сибирского филиала Академии наук СССР. Серия биологическая 1 (2): 41–72.
- Природные воды Ширинского района Республики Хакасия. 2003. В: Парначев В.П. (ред.). Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та.
- Савичев О.Г., Гусева Н.В., Абдуллаев Б.Д. 2015. Водный баланс системы озер Шира-Иткуль (Хакасия). Вестник Томского государственного университета 391: 214–219. DOI: [10.17223/15617793/391/34](https://doi.org/10.17223/15617793/391/34)
- Стенина А.С. 2009. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) в озерах востока Большеземельской тундры. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН.
- Танзыбаев М.Г. 1993. Почвы Хакасии. Новосибирск: Наука.
- Фитопланктон Омского Прииртышья: монография. 2019. В: Баженова О.П. (ред.). Омск: Изд-во ФГБОУ ВО Омский ГАУ.
- Хедаири Т., Охупкин А.Г., Генкал С.И. и др. 2022. Таксономический состав и экологическая характеристика диатомовых водорослей альгоценозов бентали устья крупной эвтрофно-гипертрофной реки (р. Ока, Россия). Биология внутренних вод 4: 372–380. DOI: [10.31857/S032096522204012X](https://doi.org/10.31857/S032096522204012X)
- Чекрыжева Т.А. 2012. Таксономическая и экологическая характеристика фитопланктона Онежского озера. Труды Карельского научного центра РАН 1: 56–69.
- Ярушина М.И., Танаева Г.В., Еремкина Т.В. 2004. Флора водорослей водоемов Челябинской области. Екатеринбург: УрО РАН.
- Barinova S. 2025. Database of Ecological Indicators of Freshwater Algae and Cyanobacteria. Ecology and Diversity 2 (2): 10003. DOI: [10.70322/ecoldivers.2025.10003](https://doi.org/10.70322/ecoldivers.2025.10003)
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2026. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 26.03.2026)
- Parnachev V.P., Degermendzhy A.G. 2002. Geographical, geological and hydrochemical distribution of saline lakes in Khakasia, Southern Siberia. Aquatic Ecology 36: 107–122. DOI: [10.1023/A:1015670130522](https://doi.org/10.1023/A:1015670130522)
- Pavlov P., Jovanovska J., Wetzal C.E. et al. 2016. Freshwater *Mastogloia* (Bacillariophyceae) taxa from Macedonia, with a description of the epizoic *M. sterijovskii* sp. nov. Diatom Research 31 (2): 85–112. DOI: [10.1007/s00037-016-0000-0](https://doi.org/10.1007/s00037-016-0000-0)

[10.1080/0269249X.2016.1157376](https://doi.org/10.1080/0269249X.2016.1157376)

Pestryakova L.A., Herzsuh U., Gorodnichev R. et al. 2018. The sensitivity of diatom taxa from Yakutian lakes (north-eastern Siberia) to electrical conductivity and other environmental variables. *Polar Research* 37: 1485625. DOI: [10.1080/17518369.2018.1485625](https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1485625)

Stenger-Kovács C., Béres V.B., Buczkó K. et al. 2023. Diatom community response to inland water salinization: a review. *Hydrobiologia* 850: 4627–4663. DOI: [10.1007/s10750-023-05167-w](https://doi.org/10.1007/s10750-023-05167-w)

Ziemann H. 1997. The influence of different ion ratios on the biological effect of salinity in running waters of Thuringia (Germany). *Limnologica* 27: 19–28.

Zimmermann-Timm H. 2007. Salinisation of inland waters. In: Lozán J.L., Grassl H., Hupfer P., Menzel L. & Schönwiese C.-D. (Eds.), *Global Change: Enough water for all?* Hamburg: Verlag Wissenschaftliche Auswertungen/GEO, pp. 133–136.