

Diatom from the Late Holocene bottom sediments of Peyungda and Zapovednoye Lakes (Evenkia, Russia)

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYBolobanshchikova G.N.^{1*}, Rogozin D.Y.^{1,2}

¹Federal Research Center "Krasnoyarsk science Center" Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (KSC SB RAS, FRC KSC SB RAS) "Institute of Biophysics Siberian Branch of Russian Academy of Science" (IBP SB RAS), Akademgorodok, 50/50, Krasnoyarsk, 660036, Russia

²Siberian Federal University, Svobodny str., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia

ABSTRACT. As part of a biostratigraphic study in the taiga zone of southern Evenkia (Krasnoyarsk Territory, Russia) within the territory of the state nature reserve "Tungusky," aimed at reconstructing paleoecological conditions of the region and as a continuation of comprehensive research on diatoms communities in the bottom sediments of various water bodies across the country initiated by diatomologists back in the first half of the last century in the USSR, an analysis was conducted of Late Holocene bottom sediments of Peyungda and Zapovednoye lakes. In total, 248 taxa below genus rank were identified belonging to 66 genera and 27 families. Similarities and differences in the composition of the diatom community in lake-bottom sediments of Lake Zapovednoye and Lake Peyungda have been revealed. The degree of similarity in species composition turned out to be high — 69%. Common trends in the development of these lakes corresponding to identical time frames have also been observed. In Lake Peyungda, which spans nearly 4,500 years, evidence has been found for the beginning of the Meghalayan stage of the Holocene epoch associated with the onset of prolonged drought approximately in 2250 BP through sustained increases in the abundance of thermophilous species such as stagnant-streaming waters *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen and stagnant water specie *Discostella stelligera* (Cleve & Grunow) Houk & Klee.

Keywords: diatoms, taxonomy, palaeoreconstruction, palaeoecology, Holocene, bottom sediments

For citation: Bolobanshchikova G.N., Rogozin D.Y. Diatom from the Late Holocene bottom sediments of Peyungda and Zapovednoye Lakes (Evenkia, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 804-823. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-804

1. Introduction

Over the past two decades, the poorly studied northeastern region of Krasnoyarsk Krai has been intensively researched, including the territory of Evenkia district and adjacent areas of Tungusky State Nature Reserve, where a significant number of small lakes predominantly with deep waters are concentrated along local rivers (Podkamennaya Tunguska, Verkhnyaya Lakura, Kimchu). These lakes share similar morphology and origin. Earlier studies focused on comparative analysis of modern diatoms assemblages in surface layers of bottom sediments from Lake Zapovednoye and Lake Cheko by analyzing samples from the upper five centimeters layers of sediments (Bolobanshchikova et al., 2023).

In addition, a large-scale multiproxy study was conducted on a sediment core from Lake Zapovednoye (Rogozin et al., 2025), which included investigation

into changes in taxonomic composition of diatom communities throughout the entire length of the core dated back over two thousand years. This study presents an analysis of diatoms community in bottom sediments of Lake Peyungda covering approximately 4.5 thousand years time interval compared to analogous research results for Lake Zapovednoye. A detailed analysis of identified common features, differences, and trends in species composition dynamics of diatom communities in both water bodies is carried out.

2. Materials and Methods

Lake Zapovednoye (60°31.688'N, 101°43.740'E) is a small body of water with an almost circular shape and a diameter of about 500 m located on the border of Tungusky State Nature Reserve (Evenkia district, Krasnoyarsk Krai), approximately 60 km from Vanavara village and about 60 km south of Lake Cheko

*Corresponding author.

E-mail address: galina.ibp@mail.ru (G.N. Bolobanshchikova)

Received: July 31, 2025; **Accepted:** August 20, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



(Bolobanshchikova et al., 2023; Rogozin et al., 2017), which is presumed to be the epicenter of the explosion in 1908. The maximum depth of the lake is around 60 meters.

Lake Peyungda ($60^{\circ}37.174'N$, $101^{\circ}38.442'E$) also has nearly perfect round form, with a diameter of about 600 m, situated 12 km northwest of Lake Zapovednoye. Its maximum depth is roughly 35 meters. Both lakes are traversed by a small river Verkhnyaya Lakura (Fig. 1), tributary of Podkamennaya Tunguska River (Rogozin et al., 2017; Rogozin et al., 2023).

Both lakes are ultra-oligotrophic — mineralization of upper layers does not exceed 40 mg/l, increasing toward bottom up to 90 mg/l. Medium reaction is close to neutral—pH 6.7. A core sample of sediments was taken from Lake Zapovednoye in July 2018, while from Lake Peyungda it was collected in September 2022.

Core samples were taken in the central deep-water parts of lakes at points with the above coordinates using a gravity corer UWITEC (Austria) equipped with removable plastic tubes having a diameter of 90 mm. A transparent tube was used so that the water-bottom boundary could be clearly seen by naked eye. Thus, loss or destruction of upper layers of bottom sediments is excluded. After transportation to the laboratory in vertical position each tube was cut along its length and divided into two longitudinal "D-sections" using two thin stainless steel plates inserted into the cut. Following core separation, the plates were removed by sliding them transversely which allowed preserving undisturbed surfaces of the cuts showing visible horizontal layered heterogeneities. Then series of color photographs of cores were made fixing millimeter ruler, after which cores were sectioned into cross-sectional slices (slices) with

step size for Lake Zapovednoye being 1 cm, while for Lake Peyungda it was 2 cm. Samples of bottom deposits selected from each slice underwent sample preparation and technical processing for diatom analysis according to previously developed method modified water bath technique using 30% H_2O_2 (Bolobanshchikova et al., 2023). Permanent preparations were prepared using high-refractive resin Naphrax. Diatom valves counting was carried out by parallel transect method up to 500 valves in upper samples and up to 300 valves in deeper sections of the core (Davydova, 1985). To construct diagrams of qualitative and quantitative composition of diatoms in bottom sediments as well as for cluster analysis Tilia Software version 3.0.3 (Grimm, 2004) was utilized. For determination of species identity established set of determinative keys and systematic compilations were applied (Kützing, 1884; Zabelina et al., 1951; Krammer et al., 1986–1991; Lange-Bertalot, 2001). When compiling the systematic list generally accepted classification of diatoms used in Russia (Glezer et al., 1988) taking into account recent revisions (Genkal et al., 2013; Guiry, 2025 from <http://www.algaebase.org/browse/taxonomy/?id=77640>) was followed. Ecological and geographical characteristics were given based on habitat, salinity, pH value, geographic distribution and rheophily (Barinova et al., 2006). The degree of similarity between diatom species compositions in studied lakes was assessed using formula:

$$K = \frac{2c}{a+b} \times 100\%,$$

where K is the similarity index degree coefficient, a and b are the number of species in lakes a and b respectively, and c is the number of similar species (Sorensen, 1948). The dating of sediments is based on previously

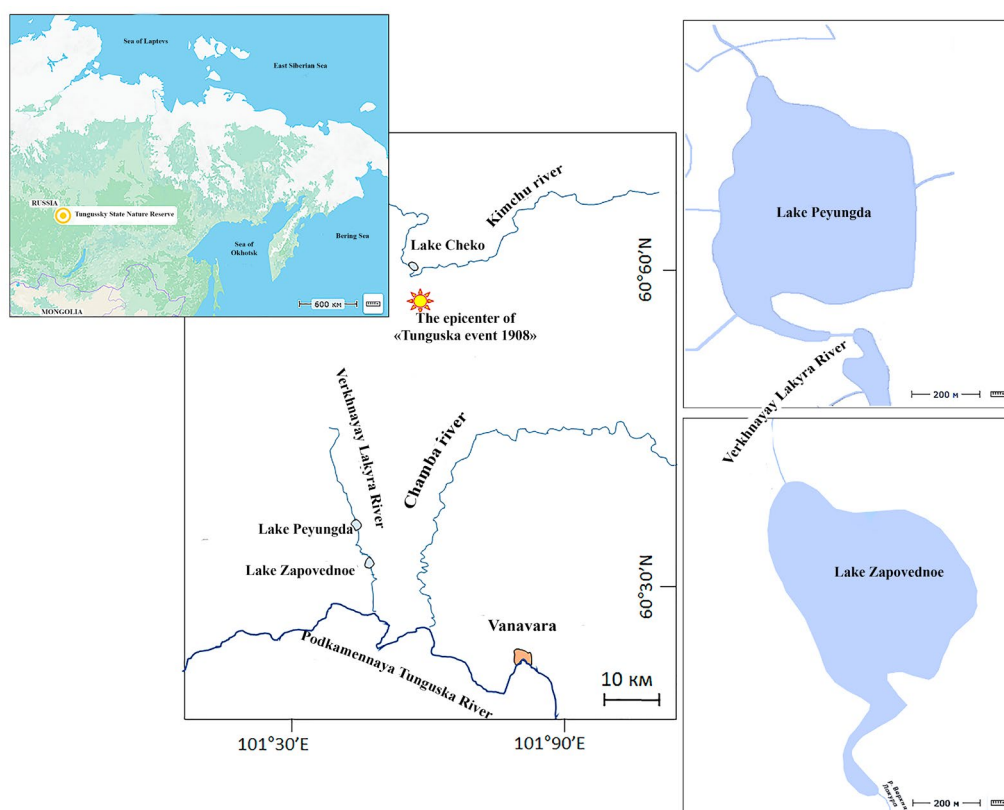


Fig.1. Map of the study area. Territory of the Tunguska State Nature Reserve (Central Tungus Plateau, Eastern Siberia, Russia). Features of geographical landscape in locations of studied objects — lakes Zapovednoye and Peyungda.

published estimates of sediment accumulation rates at 1.6 mm years⁻¹ for Lake Zapovednoye (Daryin et al., 2020) and 0.81 mm years⁻¹ for Lake Peyungda (Novikov et al., 2023).

3. Results

3.1. Systematic part

In the bottom sediments of Lakes Zapovednoye and Peyungda, a total of 248 taxa of diatom algae below genus rank were found, belonging to 27 families and 66 genera (Appendix 1). Among them are species occurring in both lakes as well as those found only in Lake Zapovednoye or only in Lake Peyungda. The degree of similarity between the species composition of diatom complexes in these studied lakes was high — 69%.

The valves of planktonic-benthic cosmopolitan species that prefer alkaline conditions dominate in the bottom deposits of both lakes. Unlike Lake Zapovednoye where most diatom valves belong to indifferent species regarding water flow and salinity, Lake Peyungda is characterized by an unprecedented abundance of *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing (up to 95%) resulting in predominance of halophobic and streaming-water species.

3.2. Paleoecological part

In quantitative terms, the composition of diatom complexes in Lake Zapovednoye and Lake Peyungda was heterogeneous and underwent multiple changes throughout the history of these water bodies' development.

3.2.1. Lake Zapovednoye

Cluster analysis allowed dividing the data from diatom analyses of the lake's core into four zones (Fig. 2).

Zone D I (approximately 1150–2200 calibrated years before present (hereafter: cal. yrs BP)) — within this zone the predominant species are planktonic-benthic diatom frustules with dominance of *Tabellaria fenestrata* (a planktonic-benthic halophobic cosmopolitan species of stagnant-streaming waters, neutral to pH environment). Despite a minimal number of benthic diatoms in this zone, it is also possible to indicate as mass species *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg) D.M.Williams & Round (benthic halophilous cosmopolitan species of stagnant-streaming waters, alkaliphilic moderate temperature regime). Overall, there is an increasing trend for planktonic diatoms in the zone, resulting in their maximum values, including the transition from subdominant position to dominant one and reaching maximum values for core samples of *Lindavia lemanensis* (Chodat) T.Nakov et al. At the same time, the proportion of small pennate diatom shells belonging to the complex *Staurosira sensu lato* — *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D.Möller (planktonic-benthic thermophilic alkaliphile cosmopolitan species of stagnant-streaming waters), *Pseudostaurosira elliptica*

(Schumann) Edlund, Morales & Spaulding (benthic cosmopolitan species) decreases. With respect to water salinity, the predominance of halophobic and indifferent species' frustules is observed. In relation to pH medium, at the lower part of the zone species preferring alkaline conditions dominate while towards the upper part acidophilic species increase in numbers. The presence of *Diploneis parma* Cleve (benthic cold-loving alkaliphile holoarctic species, indifferent to salinity) is noted. For the zone characteristic cosmopolitan species prevail, with some inclusion of arctic-alpine species' shells such as *Aulacoseira valida* (Grunow) Krammer (planktonic alkalibiont, indifferent to salinity).

The above-described changes most likely indicate increased flow rate of the reservoir, rising lake level, and decreased mineralization accompanied by formation of shallow-water zones with more acidic and mineralised environments under.

Zone D II (~435–1150 cal. yrs BP) — the share of dominant halophobic species *Tabellaria fenestrata* sharply decreases. The proportion of valves belonging to halophilic and alkaliphilous species gradually increases, as well as that of benthic forms: *Staurosirella pinnata* becomes a dominant species, while the portion of *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal (planktonic cosmopolitan alkalibiont in stagnant-streaming waters indifferent towards salinity) grows. An increase is also observed for: *Aulacoseira ambigua* (planktonic cosmopolitan alkaliphile in stagnant-streaming waters indifferent towards salinity), *A. granulata* var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen (planktonic species with moderate temperature regime in stagnant-streaming waters, cosmopolitan alkaliphile indifferent towards salinity), *A. subarctica* (O.Müller) E.Y.Haworth (planktonic alkalibiont in stagnant-streaming waters, arctic cosmopolitan indifferent towards salinity).

The share of planktonic epiphyte *Fragilaria vaucheriae* (Kützing) J.B.Petersen (planktonic cosmopolitan alkaliphile) also rises. In the upper part of this zone, *Discostella stelligera* reaches its maximum development throughout the core (planktonic-benthic cosmopolitan of streaming waters indifferent towards salinity and pH).

It is likely that there was an increase in lake productivity at a constantly high water level.

Zone D III (~25–435 cal. yrs BP) — an increase in the proportion of planktonic-benthic diatom species is noted, again dominated by *Tabellaria fenestrata*, though not as prominently as in Zone I. There is an increase in the share of *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow (planktonic-benthic temperate-zone alkaliphile indifferent towards salinity, cosmopolitan in stagnant-streaming waters), *Iconella tenera* (W.Gregory) Ruck & Nakov (planktonic-benthic alkaliphile in stagnant waters, cosmopolitan indifferent towards salinity), *Staurosira venter*, and benthic species such as dominants *Staurosirella pinnata*, *Ulnaria ulna*, among planktonic-epiphytic forms, *Fragilaria vaucheriae* remains subdominant. Cold-loving species *Diploneis parma* valves are continuously present. Overall, the zone is characterized by predominance of halophilic species preferring weakly alkaline conditions.

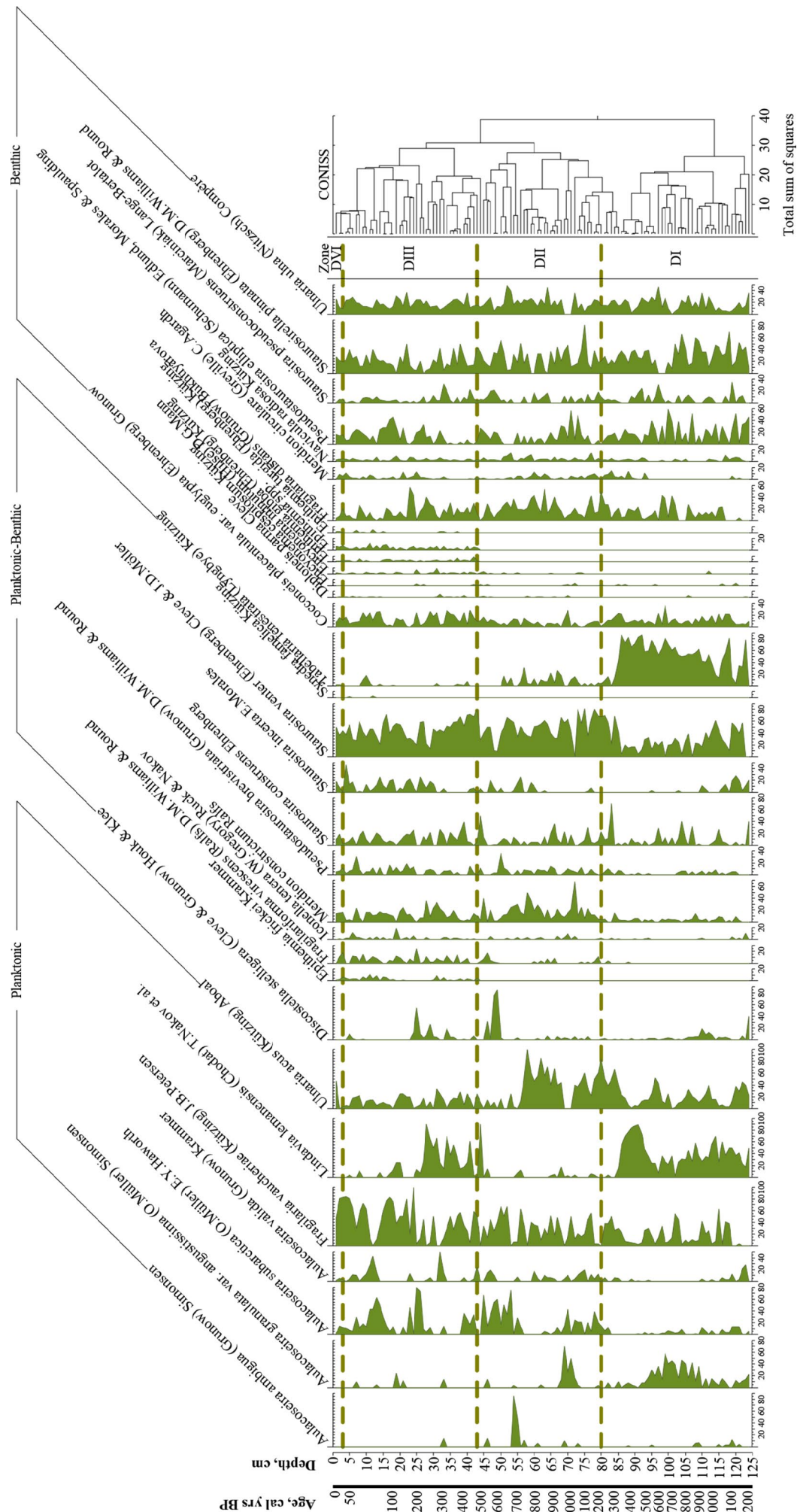


Fig.2. Distribution of diatom algae in the bottom sediments of Lake Zapovednoye. Species are presented whose number of valves was $\geq 1\%$ of the total number of valves in the preparation. (D I - D IV denote stratigraphically distinguished zones).

This most probably indicates cooling of the environment accompanied by lowering of the water level and some increase in mineralization.

Zone DIV (~0–25 cal. yrs BP) — dominance belongs to planktonic-benthic *Tabellaria fenestrata* and benthic species *Staurosirella pinnata* and *Ulnaria ulna*. The proportion of benthic and planktonic-benthic valves continues to grow, mainly represented by alkali- and halophilic forms.

Probably these changes are associated with a decrease in lake water level, presumably due to warming but maintaining the same level of mineralization, along with an increase in shallow macrophyte beds.

3.2.2. Peyungda

The cluster analysis allowed to divide the diatom data from the lake's core into five zones (Fig. 3).

DI Zone (3686–4480 cal. yrs BP) — The dominant species are planktonic-benthic forms due to *Tabellaria fenestrata* — a diatom that remains either dominant or subdominant throughout almost the entire core length. There is an increase in the proportion of *Aulacoseira muzzanensis* (planktonic-benthic, halophobic, arctic cosmopolitan species found in stagnant-streaming waters). In this zone, the share of *Discostella stelligera* remains consistently high, being subdominant at some depths within the zone. There is also an increase in the proportion of *Staurosira construens* Ehrenberg (planktonic-benthic species with moderate temperature requirements, alkaliphilous in stagnant-streaming waters, indifferent to salinity), as well as the subdominating species *Staurosira venter*. On the other hand, there is a decrease in the proportion of *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (planktonic-benthic eurythermic acidophilic, halophobic species common in stagnant-streaming waters, cosmopolitan) and *Tabellaria quadrisepata* B.M.Knudson (planktonic-benthic acidophilic species characteristic for streaming waters, halophobic, cosmopolitan).

The proportion of *Ulnaria ulna* is gradually decreasing. Due to the increase in the share of *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen, this species moves into a position as a subdominant. Overall, the proportion of planktonic species increases up to maximum values for the zone. The proportion of *Aulacoseira subarctica* also rises to the level of a subdominant. However, there is a decrease in the proportion of *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal (planktonic, cosmopolitan, alkalibiont of stagnant-streaming waters, indifferent to salinity), and *Aulacoseira valida*. Among benthic forms, an increase in the proportion of *Fragilaria distans* (Grunow) Bukhtiyarova (Grunow) Lange-Bertalot is noted. Towards the end of the zone, there is a spike in abundance of *Synedra famelica* Kützing (alkaliphilous of streaming waters, indifferent to salinity). There is also an increase in the proportion of small pennate diatom species from the complex *Staurosira sensu lato*. The proportion of *Staurosirella pinnata* reaches its maximum value for the zone, placing it in a subdominant position.

The area shows a tendency towards increased water mineralization, probably due to the decrease of lake level

that may be caused by reduced inflow (i.e., precipitation levels) and decreased outflow, most likely because of stagnant conditions within the lake. The above indicates that the lake was presumably at a stage of being shallower and more mineralized.

Zone D II (2672–3686 cal.yrs. BP) — the proportion of planktonic species is lower than in the previous zone due to a sharp decline in *Aulacoseira ambigua*. The share of *A. valida* also decreases. There is an increase in the abundance of *A. granulata* var. *angustissima* and *Fragilaria vaucheriae*, reaching maximum values throughout the core. The appearance of *Cyclotella distinguenda* Hustedt has been noted (planktonic alkaliphile of streaming waters, cosmopolitan halophile). The percentage of *Ulnaria acus* (planktonic, cosmopolitan alkalibiont of stagnant-streaming waters indifferent to salinity) increases slightly. The proportion of planktonic-benthic species is higher compared to the previous zone with a noticeable rise in dominant species *Tabellaria fenestrata*. The fraction of *Discostella* declines relative to the preceding zone. The share of *Staurosira venter* grows up to subdominant positions along with *Staurosira construens*. The proportion of *Staurosira incerta* E.Morales (planktonic-benthic, cosmopolitan) decreases. A small peak in numbers of *Aulacoseira muzzanensis* occurs (planktonic-benthic, halophob, arctic, cosmopolitan species of stagnant-streaming waters). An increase in the share of *Fragilariforma virescens* (Ralfs) D.M.Williams & Round takes place (planktonic-benthic neutrophil, cosmopolitan for stagnant waters, indifferent to salinity). Overall, the proportion of benthic species is lower than in the previous zone but their diversity increases. Notable increases are observed among the following benthic diatom species: *Fragilaria distans* (Grunow) Bukhtiyarova (Grunow) Lange-Bertalot, *Navicula radiosa* Kützing (benthic species of moderate temperature regime, cosmopolitan in stagnant-streaming waters, indifferent to salinity and pH). Subdominants include *Pseudostaurosira elliptica* and *Staurosirella pinnata*. The percentage of *Staurosira pseudoconstruens* (Marciniak) Lange-Bertalot (benthic boreal species of stagnant waters) drops from 1.67% to 0%. The share of *Ulnaria ulna* remains unstable and fluctuates across the zone.

This zone is characterized by an increase in the proportion of alkaliphilic species adapted to moderate temperatures of stagnant-streaming waters and indifferent to salinity, which might indicate an increase in lake level and formation of a moderate environmental temperature regime.

Zone DIII (≈2188–2672 cal. yrs BP) — the proportion of planktonic species continues to decline. The share of *Aulacoseira ambigua* decreases, and in the middle of the zone there is a drop in the proportion of *Fragilaria vaucheriae*. There is some increase in the proportion of *Aulacoseira subarctica*. A significant increase occurs for *Cyclotella distinguenda*. There is also an increase in the proportion of *Aulacoseira valida*. An increase in the proportion of *Ulnaria acus* leads it to become a subdominant species. After falling at the bottom of the zone, the proportion of planktonic-benthic species increases again. The dominant species

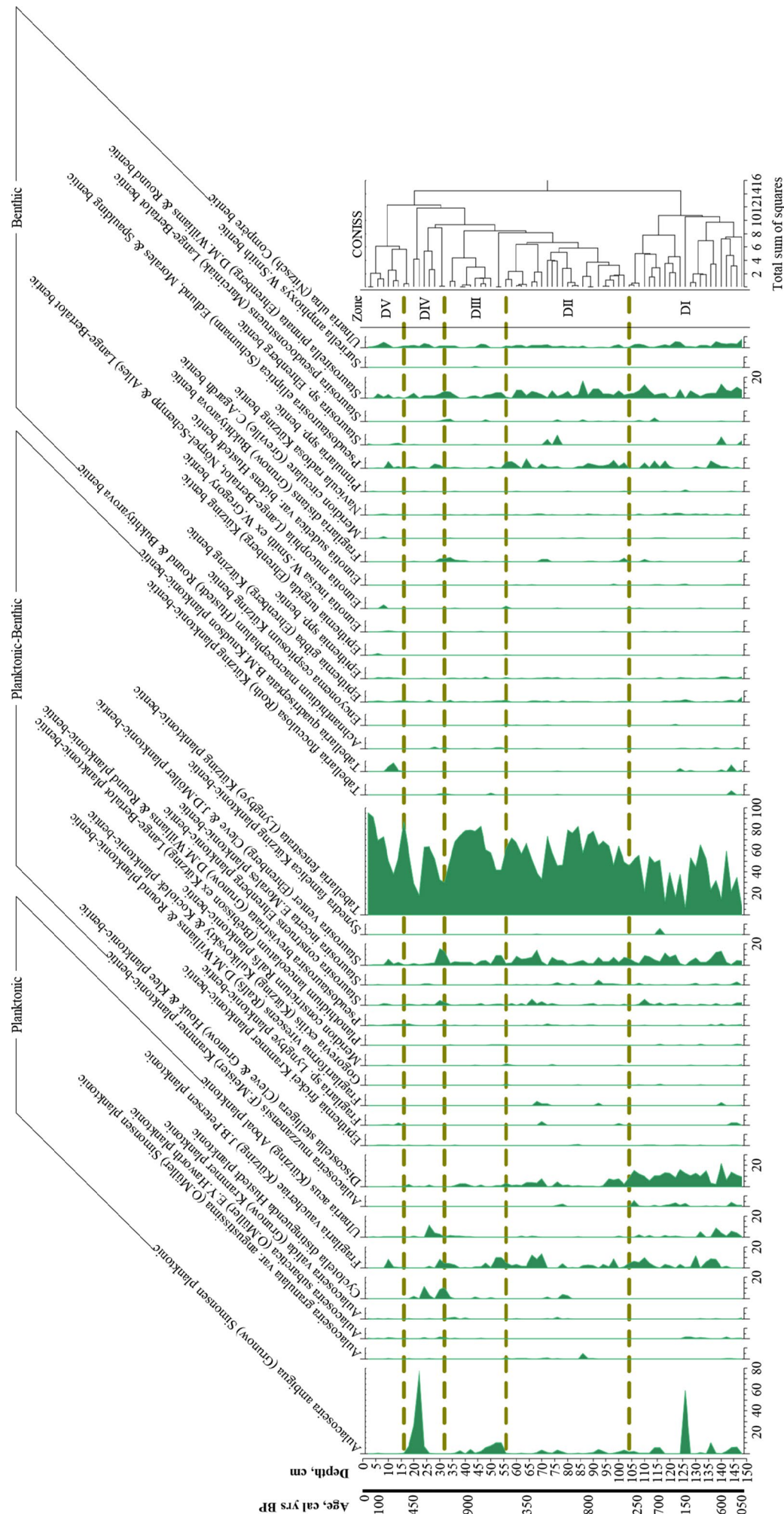


Fig.3. Distribution of diatom species in the bottom sediments of Lake Peyungda. Species with valve numbers constituting $\geq 1\%$ of total valves are presented. (Zones D I–D V represent stratigraphically defined zones.).

Tabellaria fenestrata shows increased proportions while overall *Tabellaria* decreases. Both *Staurosira construens* and *S. venter* show increasing shares making them sub-dominants as well. The proportion of *Discostella stelligera* declines. Minor species begin to appear: *Gogorevia exilis* (Kützing) Kulikovskiy & Kocielek (benthic eurythermal cosmopolitan indifferent to salinity found in stagnant-streaming waters), *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot (benthic thermophilous cosmopolitan indifferent to salinity found in stagnant-streaming waters), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round (benthic alkaliphilous cosmopolitan indifferent to salinity found in stagnant-streaming waters). The proportion of *Staurosira incerta* E. Morales (planktonic-benthic cosmopolitan) decreases. Compared to the previous zone, benthic species are less represented with reduced proportions of *Staurosirella pinnata*. The proportion of *Fragilaria distans* increases. Proportions decrease for *Pseudostaurosira elliptica*, *S. pseudoconstruens*, and *Ulnaria ulna*. Other minor benthic species that emerge include *Achnanthisidium macrocephalum* (Hustedt) Round & Bukhtiyarova (benthic cosmopolitan indifferent to both salinity and pH), *Eunotia incisa* W. Smith ex W. Gregory (benthic halophobic acidophilous cosmopolitan from streaming waters habitats), *Eu. mucophila* (Lange-Bertalot, Nörpel-Schempp & Alles), and *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh (benthic alkaliphilous cosmopolitan from streaming waters indifferent to salinity). Increases occur for *Surirella amphioxys* W. Smith (benthic mesohaline alkaliphile).

The trend observed within this zone indicates an increase in water flow rate and reduction in mineralization levels.

Zone DIV (≈ 1458 – 2186 calibrated years BP)

- the proportion of planktonic species reaches its maximum values in the entire core history due to an unprecedented increase in the share of *Aulacoseira ambigua*. The proportion of other planktonic species is negligible. The proportion of planktonic-benthic species decreases to minimum values throughout the core—the highest abundance belongs only to *Tabellaria fenestrata*, which was dominant in previous zones. The proportion of benthic species also decreases to their minimal values in the core except for *Staurosirella pinnata*, which proportion increases.

A trend towards a decrease in lake level and increased mineralization is observed within this zone.

Zone DV (≈ 0 – 1458 calibrated years BP) - the proportion of planktonic species declines to minimal values across the core—a total reduction is observed. The proportion of planktonic-benthic species achieves its maximum values over the whole core period. This increase is primarily attributed to an enhanced share of *Tabellaria fenestrata*. The proportions of all other species decline almost to zero levels. Only *Pseudostaurosira brevistriata* shows somewhat noticeable presence. The proportion of benthic species also drops to the lowest values recorded in the core's history.

An increase in eutrophication level of the water body is observed within this zone.

4. Discussion

4.1. Lake Zapovednoye

Zone DI

The dominance of valves belonging to the species *Tabellaria fenestrata*, a representative of oligotrophic diatom complex (Trifonova, 1990), may indirectly indicate water flow. Furthermore, prevalence of *T. fenestrata* is typical for small bodies of water (Slukovskiy et al., 2018). The appearance and dominance of benthic species *Staurosirella pinnata* reflects mixing of water, constant fluctuations in its level, and inflow of nutrients from catchment area (Melissa A. Watchorn et al., 2008). Decrease in proportion of this species' valves indicates stabilization of conditions related to incoming external water and its mixing capacity. After formation of stable high water levels we observe massive development of *Lindavia lemanensis*, reflecting xeno-oligosaprobic conditions established within the lake (Kagan, 2012).

Zone DII

Within this zone there are signs indicating increase in ambient temperature, evidenced by indicators such as *Aulacoseira ambigua*, *A. granulata* and their varieties (Trifonova, 1990; Stenina, 2009). Succession of species can also be traced here—from poor acidophilous and halophobic centric diatom phytoplankton towards diatoms preferring higher mineralization values, biogenic elements and pH. Massive growth of *Discostella stelligera* could be interpreted as an indicator of increasing trophicity (Trifonova, 1990). Also, emergence and progress in development of *Discostella stelligera* might be associated with change in pH since it prefers alkaline environment for its development (Camburn and Charles, 2000). Significant increase in proportion of *Discostella stelligera* valves could also relate to lowering of water level in the lake and increased mineralization amidst warming.

Zone DIII

Returning dominant positions of freshwater epiphyte *Tabellaria fenestrata* reflect processes of decreasing water level and formation of shallow-water zones overgrown with macrophytes (Patrick and Reimer, 1966). Adequate amounts of dissolved salts and biogenic elements stimulate development of benthic forms like *Staurosirella pinnata*, *Staurosira venter*, *Ulnaria ulna*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Iconella tenera*. Continuous presence of cold-loving species *Diploneis parva* valves may reflect cooling processes (Lange-Bertalot and Fuhrmann, 2017).

Zone DIV

Probably all phenomena described within this zone result from warming, decrease in water level, slight increase in mineralization and pH values, along with intensified water mixing (Hausmann and Pienitz, 2009), which benefited development of *Staurosirella pinnata*. At the same time gradual reduction in proportion of *Tabellaria fenestrata* valves was observed, whose development reflects presence of macrophyte beds in shallow waters.

4.2. Lake Peyungda

Zone DI

The increase in the proportion of planktonic species due to a significant rise in the share of *Aulacoseira ambigua* that compared to its current state, the lake was likely at an earlier stage as a shallower and more mineralized water body (Davydova, 1985). The decrease in planktonic-benthic species such as *Tabellaria sensu lato* and *Ulnaria ulna* — which are fouling organisms (Barinova et al., 2006) — probably indicates a reduction in the volume of submerged substrate (including macrophytes) necessary for their development. An increased mineralization of the water body may also play a role by creating a barrier to the growth of these halophobic diatom species. A high proportion of *Discostella stelligera* could indicate stagnation in the lake and a trend towards eutrophication (Trifonova, 1990). An increase in small sewnless pennate species belonging to *Staurosira sensu lato* might suggest the formation of shallow-water areas along the coastal zone, resulting from a lowering of the water level.

Zone DII

An increase in the proportion of *Aulacoseira sensu lato* species is favored by continuous mixing of the water column, allowing them to remain within the photic zone (Ludikova et al., 2021). In the middle of this zone, there is an increase in fouler species adapted to stagnant-streaming waters: the halophobe *T. fenestrata* and alkaliphile *Fragilaria vaucheriae*. This likely indicates massive inflows of water into the lake and a decline in its mineralization levels. There is a spike in the proportion of planktonic halophilous species typical of streaming waters, namely *Cyclotella distinguenda*, suggesting an increase in biogenic substances entering the reservoir with incoming water flows and a prolonged vegetation period due to increasing alkalinity (Glezer et al., 1988). The ongoing rise in small seamless species of *Staurosira sensu lato* may reflect an increase in silty shoreline masses where these species preferentially develop (Davydova, 1985).

Zone DIII

A decrease in the proportion of *A. ambigua* may signify another transition of the lake from being a shallow, mineralized environment to becoming deeper. At the end of the previous zone, there was a sharp drop in planktonic-benthic species due to reduced proportions of *T. fenestrata*, but during this phase, it reverses itself—its proportion increases again, possibly because of enhanced water flow through the lake. The presence of riverine fouler *Meridion circulare* in deposits during this time serves as an indicator of intense water influx specifically from the Verkhnyaya Lakura River.

Zone DIV

The record-high increase in *Aulacoseira ambigua* most likely correlates with extensive shoaling of the lake. This could be attributed to a substantial reduction in water inflow, likely associated with rising temperatures and decreased precipitation. It is probable that this phenomenon is linked to global warming occurring around this time, referred to as the “climatic optimum of early Middle Ages.”

Zone DV

Although this zone begins with a return to mass biodiversity following the preceding period, the mid-zone sees a total increase in the proportion of halophobic foulers of stagnant-streaming waters (*T. fenestrata*) negating this process.

5. Conclusions

Based on the results of the study, several conclusions can be drawn.

5.1. Systematic part

The analysis of diatom algae flora in bottom sediments from two adjacent lakes — Zapovednoye and Peyungda — showed that both lakes have a similar diatom complex with a high degree of similarity (69%). However, there are also some differences. Lake Peyungda has more species of diatoms. Additionally, there is a difference in dominant composition: while in Lake Zapovednoye representatives of the *Staurosira sensu lato* complex dominate almost throughout the core, led by benthic *Staurosirella pinnata*, in Lake Peyungda planktonic-benthic diatom *Tabellaria fenestrata* dominates almost throughout the core. At the same time, it cannot be ruled out that this species was introduced into Lake Peyungda from the Verkhnyaya Lakura River.

5.2. Paleoecological part

When moving along the two cores, one can observe common trends in changes in species composition as soon as correlation between dating of the two columns begins.

1. The most noticeable trend is an increase in the proportion of *Tabellaria fenestrata* during modern times (Zone DV for Lake Peyungda and Zones DIV and DIII for Lake Zapovednoye). Considering that this diatom prefers streaming water bodies and is halophobic, it suggests increased flow rates in both lakes and reduced mineralization, which seems to be associated with global warming and melting permafrost ice underlying the location of the lakes during the current period.
2. Another significant trend relates to the diatom *Aulacoseira ambigua* and its increasing share during what is called the “climatic optimum” period (Zone DIV for Lake Peyungda and Zone DII for Lake Zapovednoye), i.e., when there was widespread temperature rise. It appears that at this stage of lake development, both lakes experienced decreased water levels and increased mineralization.

It is worth noting separately another point in the change of diatom species composition. According to the decision of the International Commission on Stratigraphy, since 2018, the Holocene period has been divided into three geological stages (epochs): Greenlandian, Northgrippian and Meghalayan (Martin

J. Head, 2019). It is reliably known that the beginning of the Meghalayan stage is associated with the onset of a prolonged drought around 2250 BC (Martin J. Head, 2019). The dating of bottom sediments from Lake Peyungda includes the year 2480 BC, thus covering the transition from the Northgrippian stage of the Holocene period to the Meghalayan stage.

Apparently, this transition marked by drought finds its reflection in the persistent increase in the number of thermophilic species of stagnant-streaming waters (*Aulacoseira ambigua*) preferring shallow mineralized water bodies. As well as species inhabiting stagnant waters (*Discotella stelligera*) preferring water bodies with high concentration of biogenic elements, i.e., nitrogen (N) and phosphorus (P) dissolved in water, which are indicators of increased productivity of water bodies (Rühland et al., 2003).

Final word

Despite the remoteness and inaccessibility of lakes in the taiga zone of the Tunguska Nature Reserve to human influence, the observed eutrophication process in modern times for oligotrophic lakes Zapovednoye and Peyungda is a direct consequence of anthropogenic factors (Zhuze et al., 1974; Davydova, 1985). This is primarily due to an increase in average global temperatures caused by climate warming leading to melting ice layers of permafrost underlying these lake locations.

Previous research comparing diatom algae communities from recent bottom sediments of Lake Cheko and Lake Zapovednoye with high similarity in species composition (67%), along with similar trends found in changes of diatom complexes identified during this study in Lakes Zapovednoye and Peyungda, indicates the need to continue studies focused on investigating diatom complexes in lakes with highly similar species compositions.

Acknowledgements

The work was supported by RSF grant No. 22-17-00185 (extension), <https://rscf.ru/en/project/22-17-00185>.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. 2006. Biodiversity of algae-indicators of the environment. Tel Aviv: Pilies Studio Press.
- Bolobanshchikova G.N., Palagushkina O.V., Rogozin D.Yu. 2023. Species composition of diatom algae in modern bottom sediments of lakes on Central Tunguska plateau, Evenkia. *Siberian Ecological Journal* 30(2): 119–135. DOI: [10.15372/SEJ20230202](https://doi.org/10.15372/SEJ20230202)
- Camburn K.E., Charles D.F. 2000. *Diatoms of Low-Alkalinity Lakes in the Northeastern United States* Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Special Publication 18.
- Davydova N.N. 1985. *Diatoms — Indicators of Natural Conditions of Water Bodies in the Holocene*. Nauka: Saint Petersburg.
- Genkal S.I., Kulikovskiy M.S., Mikheeva T.M. et al. 2013. *Diatom Algae of River Svistlouch and its Reservoirs Plankton*. Moscow: Nauchny Mir Publ.
- Glezer Z.I., Karaeva N.I., Makarova I.V. et al. 1988. Classification of diatom algae. In: Makarov I.V. (Ed.). *Diatom Algae of USSR (fossil and extant species)*. Vol. 2, Issue 1. Leningrad: Nauka Publ., pp. 31–35.
- Grimm E. 2004. *Tilia software 2.0.2*. Springfield, Illinois: State Museum Research and Collection Center.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2025. *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, University of Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (searched on 1 August 2025)
- Hausmann S., Pienitz R. 2009. Seasonal water chemistry and diatom changes in six boreal lakes of the Laurentian Mountains (Quebec, Canada): impacts of climate and timber harvesting. *Hydrobiologia* 635: 1–14. DOI: [10.1007/s10750-009-9855-0](https://doi.org/10.1007/s10750-009-9855-0)
- Daryin A.V., Rogozin D.Yu., Meidus A.V. et al. 2020. Traces of the Tunguska event of 1908 in lake Zapovednoye bottom sediments according to scanning XRF data. *Doklady Earth Sciences* 492(2): 61–65.
- Zhuze A.P., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova-Poretskaya V.C. 1974. Research methodology. In: Glezer Z.I., Zhuze A.P., Makarova I.V. et al. (Eds.), *Diatoms of the USSR (fossil and modern)*. V. 1. Leningrad: Nauka, pp. 50–79.
- Kagan L.Ya. 2012. *Diatom Algae of Euro-Arctic Region*. Annotated Collection. Apatity: Publishing House of KSC RAS.
- Krammer K., Lange-Bertalot H. 1986–1991. *Bacillariophyceae*. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H. et al. (Eds.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*, Vol. 2. (T.1–4). Stuttgart/Jena: Gustav Fischer Verlag.
- Kützing F.T. 1844. *Die kieselschaligen Bacillarien oder Diatomeen*. Nordhausen.
- Lange-Bertalot H. 2001. *Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats*. *Navicula sensu stricto*. 10 Genera separated from *Navicula sensu lato*. *Frustulia*. A.R.G. Gantner Verlag. K.G., Vol. 2.
- Lange-Bertalot H., Fuhrmann A. 2017. *Diploneis lecohuiana* sp. nov., *D. fereparma* sp. n. and *D. parma* Cleve: rare diatoms (Bacillariophyta) in Central European freshwater. *Nova Hedwigia Beiheft* 146: 33–42.
- Ludikova A.V., Baumer M., Fyodorov G.B. et al. 2021. Paleolimnology of Lake Bol'shoy Shchuchey (Polar Urals) during Late Pleistocene-Holocene based on diatom analysis. In: *Proceedings of the Second All-Russian Scientific Conference "Ways of Evolution and Geography" dedicated to memory of Professor A.A. Velichko*, Moscow, pp. 202–206.
- Martin J., Head. 2019. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions. *Quaternary International* 500: 32–51. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.05.018](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.018)
- Novikov V.S., Daryin A.V., Rogozin D.Yu. 2023. Possible trace of catastrophic Tunguska event of 1908 in Peuyunga Lake bottom sediments as revealed by scanning micro-XRF: scientific publication. In: *Minerals: Structure, Properties, Research Methods: Materials of the XIII All-Russian Young Scientists' Conference (Yekaterinburg, May 29-June 2, 2023)*. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, pp. 222–223.
- Patrick R.M., Reimer C.W. 1966. *The Diatoms of the United States exclusive of Alaska and Hawaii*, V. 1 Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 13.
- Rogozin D.Yu., Daryin A.V., Kalugin I.A. et al. 2017. Assessment of sedimentation rate in Lake Cheko (Evenkia, Siberia): new insights into the problem of the 1908

Tunguska phenomenon. Reports of Russian Academy of Sciences. Earth Sciences 476(6): 685–687. DOI: [10.7868/S0869565217300181](https://doi.org/10.7868/S0869565217300181)

Rogozin D.Yu., Krylov P.S., Dautov A.N. et al. 2023. Morphology of Lakes at Central-Tunguska Plateau (Krasnoyarsk Territory, Evenkia): new findings regarding the problem of the 1908 Tunguska catastrophe. Reports of Russian Academy of Sciences. Earth Sciences 510(1): 81–85. DOI: [10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)

Rogozin D.Y., Nazarova L.B., Rudaya N.A. et al. 2025. Tracking Late Holocene climate change and the 1908 Tunguska impact event from lake sediments in Central Siberia. Quaternary Research 125: 1–19. DOI: [10.1017/qua.2024.35](https://doi.org/10.1017/qua.2024.35)

Rühland K., Priesnitz A., Smol J.P. 2003. Paleolimnological Evidence from Diatoms for Recent Environmental Changes in 50 Lakes across Canadian Arctic Treeline. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 35: 110–123.

Slukovskiy Z.I., Shelehova T.S., Syroezhko E.V. 2018. Response of small-lake diatom flora to heavy metal pollution under urbanized conditions in Republic of Karelia. Vestnik SPbGU. Earth Sciences 63(1): 103–124. DOI: [10.21638/11701/spbu07.2018.106](https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.106)

Sorensen T. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. Biologiske Skrifter 5: 1–34.

Stenina A.S. 2009. Diatom Algae (Bacillariophyta) in Lakes of Eastern Bol'shezemelskaya Tundra. Syktyvkar.

Trifonova I.S. 1990. Ecology and Succession of Lake Phytoplankton. Leningrad: Nauka Publ.

Watchorn M.A., Hamilton P.B., Anderson T.W. 2008. Diatoms and pollen as indicators of water quality and land-use change: a case study from the Oak Ridges Moraine, Southern Ontario, Canada. Journal of Paleolimnology 39: 491–509. DOI: [10.1007/s10933-007-9126-x](https://doi.org/10.1007/s10933-007-9126-x)

Zabelina M.M., Kiselev I.A., Proshkina-Lavrenko A.I. et al. 1951. Guide for identification of freshwater algae of the USSR. Volume 4. Diatom algae. Moscow: Soviet Science Publ.

Диатомовые водоросли позднеголоценовых отложений озёр Пеюнгда и Заповедное (Эвенкия, Россия)



Болобанщикова Г.Н.^{1*}, Рогозин Д.Ю.^{1,2}

¹ Обособленное подразделение Федерального исследовательского центра КНЦ СО РАН, «Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук» (ИБФ СО РАН) улица Академгородок, 50/50, Красноярск, 660036, Россия

² Сибирский Федеральный Университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

АННОТАЦИЯ. В рамках биостратиграфического исследования в таежной зоне юга Эвенкии (Красноярский край, Россия) на территории государственного природного заповедника «Тунгусский» с целью реконструкции палеоэкологических условий региона и в качестве продолжения комплексного исследования альгоценозов диатомовых водорослей в донных отложениях различных водоёмов страны, начатых диатомологами ещё в первой половине прошлого столетия в СССР, проведён анализ диатомового сообщества позднеголоценовых отложений озёр Пеюнгда и Заповедное. В общей сложности выявлено 248 таксонов, рангом ниже рода, относящихся к 66 родам и 27 семействам. Выявлены сходства и различия в составе диатомового альгоценоза донных отложений озёр Заповедного и Пеюнгда. Степень сходства видового состава оказалась высокой – 69%. Обнаружены общие тренды в развитии озёр, соответствующие одинаковым временным рамкам. В озере Пеюнгда, датировка которого охватывает почти 4.5 тысячи лет, найдено отражение начала мегхалайского яруса голоценовой эпохи, приуроченного к возникновению продолжительной засухи примерно в 2250 году до нашей эры путём стойкого увеличения численности теплолюбивых видов стояче-текучих *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen и вида стоячих вод *Discostella stelligera* (Cleve & Grunow) Houk & Klee.

Ключевые слова: диатомовые водоросли, таксономия, палеореконструкция, палеоэкология, голоценовые отложения

Для цитирования: Болобанщикова Г.Н., Рогозин Д.Ю. Диатомовые водоросли позднеголоценовых отложений озёр Пеюнгда и Заповедное (Эвенкия, Россия) // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 804-823. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-804

1. Введение

На протяжении двух последних десятилетий активно исследуется малоизученный в плане биостратиграфии северо-восток Красноярского края, а именно – Эвенкийский район, в т.ч. территория Государственного природного заповедника «Тунгусский», где вдоль течения местных рек (Подкаменная Тунгуска, Верхняя Лакура, Кимчу) расположено множество небольших, в основном глубоководных озёр, сходных по морфологии и происхождению (Рогозин и др., 2017; Рогозин и др., 2023).

Ранее, путем анализа верхних 5 см кернов этих водоёмов (Болобанщикова и др., 2023), детально были изучены и подвергнуты сравнительной диатомовые комплексы современных донных отложений озёр Заповедное и Чеко. Помимо этого, проведено масштабное мульти-прокси исследование керна

донных отложений озера Заповедное (Rogozin et al., 2025). В частности проанализировано изменение в видовом составе диатомового сообщества на протяжении всего керна, датировка которого включает в себя период более 2 тысяч лет. В данном исследовании проведен анализ диатомового сообщества донных отложений озера Пеюнгда, датировка которого включает в себя примерно 4.5 тысячи лет, и сравнение его с диатомовым сообществом донных осадков озера Заповедное, выявление сходства, различий и общих тенденций в изменении видового состава диатомей.

2. Материалы и методы

Озеро Заповедное (60°31.688' СШ, 101°43.740' ВД) - небольшой водоем, почти круглой формы, диаметром около 500 м, расположенный на гра-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: galina.ibp@mail.ru (Г.Н. Болобанщикова)

Поступила: 31 июля 2025; **Принята:** 20 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



нице Государственного природного заповедника «Тунгусский» (Эвенкийский район Красноярского края), в 60 км от поселка Ванавара, и приблизительно в 60 км к югу от озера Чеко (Болобанщикова и др., 2023; Рогозин и др., 2017) предполагаемого эпицентра взрыва 1908 г. Максимальная глубина озера около 60 м. Озеро Пеюнга (60°37.174' СШ 101°38.442' ВД) также имеет почти правильную округлую форму, диаметром около 600 м, и расположено в 12 км к северо-западу от оз. Заповедное. Максимальная глубина озера приблизительно 35 м. Через оба озера протекает небольшая река Верхняя Лакура (Рис. 1), приток реки Подкаменная Тунгуска (Рогозин и др., 2017; Рогозин и др., 2023). Оба озера ультрапресные – минерализация верхних слоёв не превышает 40 мг/л, ко дну увеличивается до 90 мг/л. Реакция среды близка к нейтральной - pH 6.7. КERN донных отложений оз. Заповедное был отобран в июле 2018 г., а оз. Пеюнга - в сентябре 2022 г.

Керны отбирали в центральной глубоководной части озер в точках с вышеуказанными координатами с помощью гравитационного пробоотборника UWITEC (Австрия) со съемной пластиковой трубой диаметром 90 мм. Использовали прозрачную трубу, поэтому граница «вода-дно» была отчетливо видна невооруженным глазом. Следовательно, исключена возможность потери или разрушения верхних слоев донных отложений. После транспортировки в лабораторию в вертикальном положении каждую трубу разрезали вдоль и разделяли пополам на две продольные «Д-секции» с помощью двух тонких пластин из нержавеющей стали, вставленных в разрез. После разделения керна, пластины удалялись сдвигом в поперечном направлении, что позволяло сохранить

ненарушенными поверхности разреза с видимыми горизонтальными слоистыми неоднородностями. Затем делались серии цветных фотографий кернов с закрепленной миллиметровой линейкой, после чего керны разделялись на поперечные образцы (слайсы) с шагом для оз. Заповедное с шагом в 1 см, а для оз. Пеюнга в 2 см. Образцы донных отложений, отобранные из каждого слайса, проходили пробоподготовку и техническую обработку на диатомовый анализ по отработанной ранее методике видоизмененной водяной бани с использованием 30% H_2O_2 (Болобанщикова и др., 2023). Постоянные препараты готовились с применением высокопреломляющей смолы Naphrax. Подсчет створок диатомовых проводился методом параллельных трансект до 500 створок в верхних образцах и до 300 створок в толще керна (Давыдова, 1985). Для построения диаграмм качественного и количественного состава диатомовых в донных отложениях, а также для кластерного анализа использовали Tilia Software 3.0.3 (Grimm, 2004). Для определения видовой принадлежности диатомовых использовали устоявшийся набор определителей и систематических сводок (Kützing, 1884; Забелина и др., 1951; Krammer et al., 1986-1991; Lange-Bertalot, 2001). При составлении систематического списка использована общепринятая в России классификация диатомовых водорослей (Глезер и др., 1988), с учетом последних ревизий (Генкал и др., 2013; Guiry, 2025 from <http://www.algaebase.org/browse/taxonomy/?id=77640>). Эколого-географическая характеристика давалась по отношению к местообитанию, солёности, pH воды, по географическому распространению и реофильности (Баринова и др., 2006).

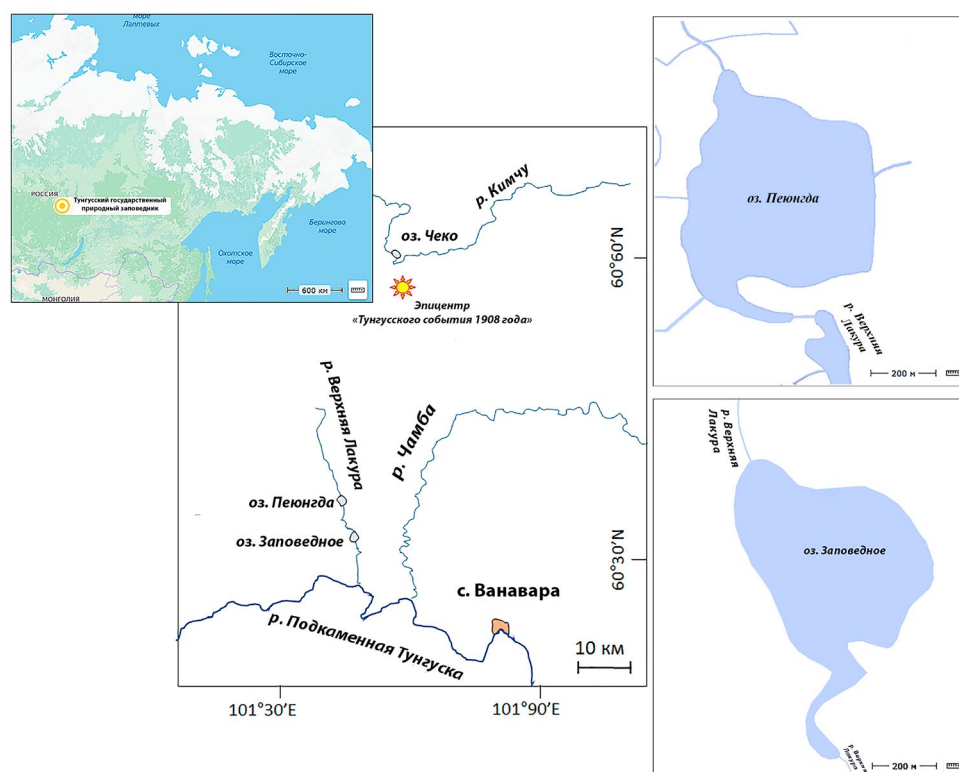


Рис.1. Карта-схема области исследования. Территория Тунгусского государственного природного заповедника (Центрально-Тунгусское плато, Восточная Сибирь, Россия). Особенности географического ландшафта в местах расположения объектов изучения - озёр Заповедное и Пеюнга.

Оценка степени сходства видового состава диатомовых комплексов в исследуемых озерах вычислялась по формуле:

$$K = \frac{2c}{a+b} \times 100\%$$

где K – коэффициент индекса степени сходства, а и b – число видов в озерах а и b, с – число сходных видов (Sorensen, 1948).

Датировка отложений основана на ранее опубликованных оценках скорости накопления донных отложений в 1.6 мм год⁻¹ для озера Заповедное (Дарьин и др., 2020) и в 0.81 мм в год⁻¹ для озера Пеюнгда (Новиков и др., 2023).

3. Результаты

3.1. Систематическая часть

В донных отложениях озёр Заповедное и Пеюнгда было обнаружено 248 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода, относящихся к 27 семействам и 66 родам (Прил. 1). Среди них есть виды, встречающиеся как в обоих озёрах, так и виды, обнаруженные только в оз. Заповедное или только в оз. Пеюнгда. Степень сходства видового состава диатомовых комплексов в исследуемых озерах оказалась высокой - 69%.

В донных осадках обоих озёр преобладают створки планктонно-бентосных космополитных видов, предпочитающих щелочную реакцию среды. В отличие от озера Заповедное, где створки диатомовых в основной массе относятся к видам, индифферентным по отношению к течению воды и солёности, в озере Пеюнгда, ввиду беспрецедентной массовости доли вида *Tabellaria fenestrata* (Lyngbye) Kützing (до 95%), основная масса приходится на галофобные и проточные виды.

3.2. Палеоэкологическая часть

В количественном отношении состав диатомовых комплексов озёр Заповедное и Пеюнгда обладал неоднородностью и претерпевал за историю развития водоёмов неоднократные изменения.

3.2.1. Озеро Заповедное

Кластерный анализ позволил разделить данные диатомового анализа колонки озёра на 4 зоны (Рис. 2).

Зона D I (≈ 1150-2200 калиброванных лет назад (далее: кал. л.н.)) - в пределах выделенной зоны преобладают створки планктонно-бентосных видов с доминированием *Tabellaria fenestrata* (планктонно-бентосный галофоб, космополит стояче-текучих вод, нейтральный по отношению к pH-среде). Несмотря на минимальное количество бентосных диатомовых в этой зоне, массовым видом можно также указать *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg) D.M.Williams & Round (бентосный галофил стояче-текучих вод, алкалофильный космополит умеренного температурного режима). В целом в зоне

наблюдается тенденция на увеличение планктонных диатомовых, что выливается в максимальные для них значения, в т.ч. благодаря выход с позиции субдоминанта до доминирующего и максимальных значений для керна *Lindavia lemanensis* (Chodat) T.Nakov et al. При этом снижается доля створок мелких пенатных диатомовых комплекса *Staurosira sensu lato* - *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J.D.Möller (планктонно-бентосный, теплолюбивый вид алкалофил, космополит стояче-текучих вод), *Pseudostaurosira elliptica* (Schumann) Edlund, Morales & Spaulding (бентосный космополит). По отношению к солёности воды преобладают створки галофобных и индифферентных видов. По отношению к pH среды в В нижней части зоны преобладают виды, предпочитающие щелочную среду, в верхней части зоны увеличивается число ацидофильных видов. Отмечается присутствие *Diploneis parva* Cleve (бентосный, холодолюбивый алкалофил, голарктический вид, индифферентный по отношению к солёности). Для зоны характерны космополитные виды, с некоторым включением створок аркто-альпийских видов, например *Aulacoseira valida* (Grunow) Krammer (планктонный алкалобионт, индифферентный по отношению к солёности).

Вышеописанное скорее всего свидетельствует об увеличении проточности водоёма, повышении уровня озера и уменьшении его минерализации, сопряженное с появлением зон мелкозидий с более кислой и минерализованной средой.

Зона D II (≈ 435-1150 кал. л.н.) – резко снижается доля доминантного галофобного вида *Tabellaria fenestrata*. Постепенно увеличивается доля створок галофильных и предпочитающих щелочную реакцию среды видов, возрастает доля бентосных видов: *Staurosirella pinnata* становится доминантным видом, возрастает доля *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal (планктонный, космополит, алкалобионт стояче-текучих вод, индифферентный по отношению к солёности). Увеличивается доля *Aulacoseira ambigua* (планктонный, космополит, алкалофил стояче-текучих вод, индифферентный по отношению к солёности), *A. granulata* var. *angustissima* (O.Müller) Simonsen (планктонный вид умеренного температурного режима, стояче-текучих вод, космополитный алкалофил, индифферентный к солёности), *A. subarctica* (O.Müller) E.Y.Haworth (планктонный алкалобионт, стояче-текучих вод, арктический космополит, индифферентный к солёности). Также увеличивается доля планктонного эпифита - *Fragilaria vaucheriae* (Kützing) J.B.Petersen (планктонный, космополит, алкалофил). В верхней части зоны происходит достигает своего максимального развития на протяжении всего керна *Discostella stelligera* (планктонно-бентосный космополит стоячих вод, индифферентный по отношению к солёности и pH).

Скорее всего можно говорить о повышении продуктивности в озере при постоянно высоком уровне воды.

Зона D III (≈ 25-435 кал. л.н.) - отмечается рост доли створок планктонно-бентосных видов, снова с доминированием, хотя и не в таком объеме



Рис. 2. Распределение диатомовых водорослей в донных отложениях озере Заповедное. Представлены виды, число створок которых составляло $\geq 1\%$ от общего числа створок в препарате. (Д I - Д IV обозначены стратиграфически-выделенные зоны).

как в Зоне DI, *Tabellaria fenestrata*. Возрастает доля *Cocconeis placentula* var. *euglypta* (Ehrenberg) Grunow (планктонно-бентосный алкалофил умеренных широт, индифферентный по отношению к солёности, космополит стояче-текучих вод), *Iconella tenera* (W.Gregory) Ruck & Nakov (планктонно-бентосный алкалофил стоячих вод, космополит, индифферентный по отношению к солёности), *Staurosira venter* и бентосных видов с доминантами *Staurosirella pinnata*, *Ulnaria ulna*, из планктонных-эпифитных сохраняет свои позиции на уровне субдоминанта *Fragilaria vaucheriae*. Отмечается постоянное присутствие створок холодолюбивого вида *Diploneis parva*. В целом зона характеризуется преобладанием галофильных видов, предпочитающих слабощелочные условия среды.

Указанное выше скорее всего свидетельствует о похолодании окружающей среды, сопряженное с понижением уровня воды и некоторым повышением минерализации.

Зона DIV ($\approx 0-25$ кал. л.н.) - в зоне доминируют планктонно-бентосная *Tabellaria fenestrata* и бентосные *Staurosirella pinnata* и *Ulnaria ulna*. Продолжается рост доли створок бентосных и планктонно-бентосных, преимущественно алкалофилов и галофилов.

Вероятно, вышеуказанные изменения связаны с понижением уровня воды в озере, скорее всего на фоне потепления, при сохранении уровня минерализации, и увеличения числа мелководных зарослей макрофитов.

3.2.2. Пеюнгда

Кластерный анализ позволил разделить данные диатомового анализа колонки озера на 5 зон (Рис. 3).

Зона DI ($\approx 3686-4480$ кал. л.н.) - основную массу составляет планктонно-бентосные виды благодаря *Tabellaria fenestrata* – диатомовой, которая на протяжении практически всего керна является либо доминирующим видом, либо субдоминантом. Увеличивается доля *Aulacoseira muzzanensis* (F.Meister) Krammer (планктонно-бентосный, галофоб, арктический, космополитный вид стояче-текучих вод). Стабильно высокой в зоне остаётся доля *Discostella stelligera*, субдоминирующая на некоторых глубинах в зоне. Увеличивается доля *Staurosira construens* Ehrenberg (планктонно-бентосный вид умеренного температурного режима, алкалофил стояче-текучих вод, индифферентный к солёности) и суддоминирующего вида *Staurosira venter*. Уменьшается доля *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kützing (планктонно-бентосный, эвритермный ацидофил, галофоб стояче-текучих вод, космополит) и *Tabellaria quadrisepata* B.M.Knudson (планктонно-бентосный ацидофил проточных вод, галофоб, космополит).

Доля *Ulnaria ulna* постепенно снижается. Благодаря возрастанию доли *Aulacoseira ambigua* вид выходит на позиции субдоминант. В целом, доля планктонных видов увеличивается до макси-

мальных значений для зоны. Увеличивается доля *Aulacoseira subarctica* до позиции субдоминанта. Однако уменьшается доля *Ulnaria acus* (Kützing) Aboal (планктонный, космополит, алкалобионт стояче-текучих вод, индифферентный по отношению к солёности) и *Aulacoseira valida*. Среди бентосных отмечается увеличение доли *Fragilaria distans* (Grunow) Bukhtiyarova (Grunow) Lange-Bertalot. Ближе к концу зоны отмечается всплеск численности *Synedra famelica* Kützing (алкалофил проточных вод, индифферентный к солёности). Увеличивается доля мелких пенных диатомовых комплекса *Staurosira sensu lato*. Доля *Staurosirella pinnata* увеличивается до максимальных значений для зоны, выводя её на позиции субдоминанта.

В зоне наблюдается тенденция к увеличению минерализации воды, вероятно за счёт уменьшения уровня водоёма, которое возможно вызвано уменьшением притока воды (=уровня осадков) и уменьшением проточности, скорее всего из-за стагнации условий в озере. Вышеперечисленное говорит о том, что озеро, скорее всего, находилось на стадии более мелкого и более минерализованного водоёма.

Зона DII ($\approx 2672-3686$ кал. л.н.) - доля планктонных видов ниже, чем в предыдущей зоне из-за резкого уменьшения доли *Aulacoseira ambigua*. Доля *A. valida* также снижается. Увеличивается доля *A. granulata* var. *angustissima* и *Fragilaria vaucheriae*, достигающая максимальных значений на протяжении всего керна. Отмечено появление *Cyclotella distinguenda* Hustedt (планктонный алкалофил проточных вод, космополитный галофил). Несколько увеличивается доля *Ulnaria acus* (планктонный, космополит, алкалобионт стояче-текучих вод, индифферентный по отношению к солёности). Доля планктонно-бентосных видов выше, чем в предыдущей зоне - заметно возрастает доля доминирующего вида *Tabellaria fenestrata*. Доля *Discostella* снижается по сравнению с предыдущей зоной. Увеличивается доля *Staurosira venter* до позиций субдоминанта и *Staurosira construens*. Доля *Staurosira incerta* E.Morales (планктонно-бентосный, космополит) уменьшается с Отмечен небольшой всплеск численности *Aulacoseira muzzanensis* (планктонно-бентосный, галофоб, арктический, космополитный вид стояче-текучих вод). Увеличивается доля *Fragilariforma virescens* (Ralfs) D.M.Williams & Round (планктонно-бентосный нейтрофил, космополит стоячих вод, индифферентный по отношению к солёности). В целом доля бентосных видов ниже, чем в предыдущей зоне, однако увеличивается их разнообразие. Отмечается увеличение доли следующих бентосных диатомовых: *Fragilaria distans* (Grunow) Bukhtiyarova (Grunow) Lange-Bertalot, *Navicula radiosa* Kützing (бентосный вид умеренного температурного режима, космополит стояче-текучих вод, индифферентный по отношению к солёности и pH). На позиции субдоминантов выходят *Pseudostaurosira elliptica* и *Staurosirella pinnata*. Уменьшается доля *Staurosira pseudoconstruens* (Marciniak) Lange-Bertalot (бентосный, бореальный вид стоячих вод) с 1.67% до 0%. Доля *Ulnaria ulna* нестабильна и колеблется на протяжении зоны.

Зона характеризуется увеличением доли алкалифильных видов, умеренного температурного режима стояче-текучих вод, индифферентных по отношению к солёности, что может свидетельствовать об увеличении уровня озера и установлении умеренного температурного режима окружающей среды.

Зона DIII ($\approx 2188-2672$ кал. л.н.) - доля планктонных продолжает снижаться. Уменьшается доля *Aulacoseira ambigua*, в середине зоны отмечается проседание в доли *Fragilaria vaucheriae*. Несколько подрастает доля *Aulacoseira subarctica*. Существенно увеличивается доля *Cyclotella distinguenda*. Несколько увеличивается доля *Aulacoseira valida*. Увеличивается доля *Ulnaria acus*, выходя на позиции субдоминанта. Доля планктонно-бентосных видов повышается после падения внизу зоны. Увеличивается доля доминирующего вида *Tabellaria fenestrata*. Доля *Tabellaria* уменьшается. Увеличивается доля *Staurosira construens* и *St. venter* делая его субдоминантом. Уменьшается доля *Discostella stelligera*. Проявляют себя минорные виды: *Gogorevia exilis* (Kützing) Kulikovskiy & Kociolek (бентосный, эвритермный вид стояче-текучих вод, алкалифильный космополит, индифферентный к солёности), *Planothidium lanceolatum* (Brébisson ex Kützing) Lange-Bertalot (бентосный, теплолюбивый вид стояче-текучих вод, алкалифильный космополит, индифферентный к солёности), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round (бентосный, алкалифильный космополит стояче-текучих вод, индифферентный к солёности). Уменьшается доля *Staurosira incerta* E. Morales (планктонно-бентосный, космополит). Доля бентосных видов уменьшается по сравнению с предыдущей зоной. Уменьшается доля *Staurosirella pinnata*. Доля *Fragilaria distans* увеличивается. Уменьшается доля *Pseudostaurosira elliptica*, *St. pseudoconstruens* и *Ulnaria ulna*. Также проявляют себя некоторые бентосные минорные виды *Achnanthyidium macrocephalum* (Hustedt) Round & Bukhtiyarova (бентосный, индифферентный по отношению к солёности к pH космополит), *Eunotia incisa* W. Smith ex W. Gregory (бентосный галофоб проточных вод, ацидофильный космополит), *Eu. micophila* (Lange-Bertalot, Nörpel-Schempp & Alles) и *Meridion circulare* (Greville) C. Agardh (бентосный алкалифил проточных вод, космополит, индифферентный к солёности). Отмечается увеличение доли *Surirella amphioxys* W. Smith (бентосный, мезогалобный алкалифил).

В зоне наблюдается тенденция к увеличению проточности водоёма и уменьшению его минерализации.

Зона DIV ($\approx 1458-2186$ кал. л.н.) - доля планктонных видов достигает своих максимальных значений в истории всего керна благодаря беспрецедентному увеличению доли *Aulacoseira ambigua*. Доля прочих планктонных видов незначительна. Доля планктонно-бентосных видов снижается до минимальных значений во всём керне – максимальная численность присуща только доминанту предыдущих зон *Tabellaria fenestrata*. Доля бентос-

ных видов также снижается до своих минимальных значений в керне за исключением вида *Staurosirella pinnata*, чья доля увеличивается.

В зоне наблюдается тенденция к уменьшению уровня озера и увеличению минерализации.

Зона DV ($\approx 0-1458$ кал. л.н.) - доля планктонных снижается до минимальных значений в керне - наблюдается тотальное их снижение. Доля планктонно-бентосных достигает своих максимальных значений на протяжении всего керна. Основной прирост доли планктонно-бентосных видов происходит за счёт увеличения доли *Tabellaria fenestrata*. Доля всех прочих видов снижается практически до нулевых значений. Более-менее заметна доля *Pseudostaurosira brevistriata*. Доля бентосных видов также снижается до минимальных значений в истории керна.

В зоне наблюдается рост уровня эвтрофикации водоёма.

4. Обсуждение

4.1. Озеро Заповедное

Зона D I

Доминирование створок вида *Tabellaria fenestrata* – представителя олиготрофного диатомового комплекса (Трифорова, 1990) может косвенно указывать на проточность воды. Кроме того, преобладанием створок *T. fenestrata* характерно для небольших водоёмов (Слуковский и др., 2018). Появление и доминирование бентосного вида *Staurosirella pinnata* отражает перемешивание воды, постоянное колебание ее уровня и приток питательных веществ с водосбора (Watchorn et al., 2008). Снижение доли створок этого вида отразило стабилизацию условий по притекающей извне воде и ее перемешиваемости. И после формирования стабильно высокого уровня воды наблюдаем массовое развитие вида *Lindavia lemanensis*, отражающем ксено-олигосапробные условия, сложившиеся в озере (Каган, 2012).

Зона D II

В пределах этой зоны отмечаются признаки повышения температуры окружающей среды, индикаторами которого являются *Aulacoseira ambigua*, *A. granulata* и ее варианты (Трифорова, 1990; Стенина, 2009). Также прослеживается сукцессия видов от бедного диатомового планктона с преобладанием планктонных центральных диатомей ацидофильных и галофобных на диатомовые, предпочитающих большие значения минерализации, биогенных элементов и pH. Массовое развитие *Discostella stelligera* можно интерпретировать как индикатор повышения трофности (Трифорова, 1990). Также появление и прогресс в развитии *Discostella stelligera* может быть связан со сменой pH, поскольку для своего развития этот вид предпочитает щелочную реакцию среды (Camburn and Charles, 2000). Значительное увеличение доли створок *Discostella stelligera* можно также связать с понижением уровня воды в озере и повышением минерализации на фоне потепления.

Зона D III

Возврат доминирующих позиций пресноводного эпифита *Tabellaria fenestrata* отражает процессы понижения уровня воды, формирования зон мелководий, поросших макрофитами (Patrick and Reimer, 1966). Достаточное количество растворенных солей и биогенных элементов стимулирует развитие бентосных *Staurosirella pinnata*, *Staurosira venter*, *Ulnaria ulna*, *Cocconeis placentula* var. *euglypta*, *Iconella tenera*. Постоянное присутствие створок холодолюбивого вида *Diploneis parva* может отражать процессы похолодания (Lange-Bertlot and Fuhrmann, 2017).

Зона DIV

Вероятно, всё описанное в пределах зоны, является следствием потепления, понижения уровня воды и некоторого увеличения уровня минерализации и значений pH, а также усиления перемешивания воды (Hausmann and Pienitz, 2009), что благоприятно отразилось на развитии вида *Staurosirella pinnata*. При этом постепенно уменьшилась доля створок *Tabellaria fenestrata*, развитие которой отражает наличие зарослей макрофитов на мелководье.

4.2. Озеро Пеюнгда

Зона DI

Увеличение доли планктонных видов за счёт существенного возрастания доли *Aulacoseira ambigua* говорит о том, что, скорее всего, по сравнению с современным состоянием, озеро находилось на стадии более мелкого, более минерализованного водоёма (Давыдова, 1985). Уменьшение планктонно-бентосных видов *Tabellaria sensu lato*, *Ulnaria ulna* – вида-образователя (Баринова и др., 2006), вероятно, говорит об уменьшении объёма погружного субстрата (в т.ч., растений макрофитов), необходимых для развития этих диатомей. Свою роль может играть и увеличение минерализации водоёма, которая служит барьером для развития этих галофобных диатомовых. Высокая доля *Discostella stelligera* может указывать на стагнацию в озере и тенденцию к эвтрофикации (Трифонов, 1990). Увеличение доли мелких бесшовных, пеннатных видов *Staurosira sensu lato* может об образовании в озере мелководных участков прибрежной зоны, что является следствием понижения уровня водоёма.

Зона DII

Увеличению доли видов *Aulacoseira sensu lato* благоприятствует постоянное перемешивание водной толщи, позволяющее им удерживаться в фотической зоне (Лудикова и др., 2021). Увеличение в середине зоны доли видов-образователей стояче-текучих вод: галофоба *T. fenestrata* и алкалифила *Fragilaria vaucheriae* вероятно свидетельствует о массовом притоке воды в озеро и снижении его минерализации. Происходит всплеск доли планктонного галофила проточных вод *Cyclotella distinguenda*, что может свидетельствовать об увеличении поступления в водоём биогенного вещества с притоком воды и об удлинении периода вегетации за счёт защелачивания водоёма (Глезер и др., 1988).

Продолжающийся прирост доли мелких бесшовных видов *Staurosira sensu lato* может говорить об увеличении иловых прибрежных масс, в которых эти виды предпочитают развиваться (Давыдова, 1985).

Зона DIII

Уменьшение доли *A. ambigua* может говорить об очередном переходе озера из состояния мелководного, минерализованного в стадию более глубоководного. Произошедшее к концу предыдущей зоны резкое падение планктонно-бентосных видов за счёт снижения доли *T. fenestrata*, в этот период реверсивно – её доля вновь возрастает, вероятно, за счёт увеличения проточности озера. Присутствие в отложениях в этот период речного обрастателя *Meridion circulare*, является индикатором интенсивности притока воды именно из реки Верхняя Лакура.

Зона DIV

Рекордный прирост *Aulacoseira ambigua* скорее всего связан с массивным обмелением озера. Это может быть обусловлено существенным уменьшением притока воды, скорее всего связанного с увеличением температурного режима и уменьшением уровня осадков. Вероятно, это связано с глобальным повышением температур в это время, получившее название «климатический оптимум раннего Средневековья».

Зона DV

Хотя, после предыдущего периода, эта зона и начинается с возвращения к массовому биоразнообразию, с середины зоны тотальное увеличение доли галофобного обрастателя стояче-текучих *T. fenestrata* нивелирует этот процесс.

5. Выводы

Исходя из результатов исследования можно сделать несколько выводов.

5.1. Систематическая часть

Проведенный анализ диатомовой альгофлоры донных отложений двух близкорасположенных озёр Заповедное и Пеюнгда показал, что в озёрах присутствует схожий диатомовый комплекс, степень сходства которого довольно высокая – 69%. Однако есть ряд отличий. В оз. Пеюнгда видов диатомовых оказалось больше. Кроме того, существует отличие и в доминирующих составе: если в оз. Заповедное главенствующую роль на протяжении почти всего керна занимают представители комплекса *Staurosira sensu lato*, во главе с бентосной *Staurosirella pinnata*, то в оз. Пеюнгда роль безусловного доминанта почти на протяжении всего керна занимает планктонно-бентосная диатомовая *Tabellaria fenestrata*. В то же время, не стоит исключать фактор заноса в озеро Пеюнгда этого вида из реки Верхняя Лакура.

5.2. Палеоэкологическая часть

При движении по двум колонкам, можно заметить, что при начале корреляции датировок

двух колонок, начинают наблюдаться общие тенденции в изменении видового состава.

1. Самым заметным трендом является прирост доли *Tabellaria fenestrata* в современный период (Зона DV для озера Пеюнгда и Зоны DIV и DIII для озера Заповедное). Если брать во внимание тот факт, что эта диатомовая предпочитает проточные водоёмы и является галофобом, напрашивается вывод об увеличении проточности в обоих озёрах и снижении минерализации, что, по-видимому связано с глобальным потеплением и таянием льдов вечной мерзлоты, залегающих под местом нахождения озёр в современный период.
2. Следующий заметный тренд относится к диатомовой *Aulacoseira ambigua* и возрастание её доли в так называемый период «климатического оптимума» (Зона DIV для озера Пеюнгда и Зона DII для озера Заповедное), т.е. в период повсеместного увеличения температуры окружающей среды. По всей видимости, в этот этап развития озёр для обоих характерно снижение уровня воды и увеличение степени минерализации.

Отдельно стоит отметить ещё один момент в изменении видового состава диатомовых водорослей. Согласно решению Международной комиссии по стратиграфии, голоценовый период с 2018 года разделен на три геологических яруса (века): гренландский, северогриппианский и мегхалайский (Martin J. Head, 2019). Достоверно известно, что начало мегхалайского яруса привязано к возникновению продолжительной засухи примерно в 2250 году до нашей эры (Martin J. Head, 2019). Датировка донных отложений озера Пеюнгда включает в себя 2480 год до н.в., таким образом, захватывая переход от северогриппианского яруса голоценового периода к мегхалайскому ярусу.

По-видимому, этот переход, ознаменовавшийся засухой, находит своё отражение в стойком увеличении численности теплолюбивых видов стояче-текучих (*Aulacoseira ambigua*), предпочитающих мелководные, минерализованные водоёмы. А также видов стоячих вод (*Discotella stelligera*), предпочитающих водоёмы с высокой концентрацией биогенных элементов, т.е., растворенных в воде азота (N) и фосфора (P), и являющиеся индикаторами повышения продуктивности водоёмов (Rühland et al., 2003).

6. Заключение

Несмотря на удаленность и недоступность озёр таёжной зоны Тунгусского заповедника для влияния человека, наблюдаемое в современный период развития олиготрофных озёр Заповедное и Пеюнгда эвтрофизирование, является прямым следствием антропогенного фактора (Жузе и др., 1974; Давыдова, 1985). В первую очередь это связано с увеличением средних температур на Земле, вызванных глобальным потеплением климата, ведущих к таянию льдов вечной мерзлоты, залегающих под местом нахождения озёр.

Проведённое ранее исследование и сравнение диатомового альгоценоза современных донных отложений озера Чеко и озера Заповедное, с высокой степенью сходства видового состава (67%) и обнаруженные там схожие тенденции в изменении диатомовых комплексов, сходные с теми, что обнаружены в данном исследовании в озёрах Заповедное и Пеюнгда, говорит нам о необходимости продолжать исследования в направлении изучения диатомовых комплексов в озёрах с высокой степенью сходства видового состава.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-17-00185 (продление) <https://rscf.ru/project/22-17-00185>.

Конфликт интересов

Авторы не имеют конфликта интересов.

Список литературы

- Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. 2006. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: Pilies Studio Press.
- Болобанщикова Г.Н., Палагушкина О.В., Рогозин Д.Ю. 2023. Видовой состав диатомовых водорослей в современных донных отложениях озёр Центрально-Тунгусского плато, Эвенкия. Сибирский экологический журнал 30(2): 119–135. DOI: [10.15372/SEJ20230202](https://doi.org/10.15372/SEJ20230202)
- Генкал С.И., Куликовский М.С., Михеева Т.М. и др. 2013. Диатомовые водоросли планктона реки Свислочь и ее водохранилищ. Москва: Научный мир.
- Глезер З.И., Караева Н.И., Макарова И.В. и др. 1988. Классификация диатомовых водорослей. В: Макарова И.В. (ред.), Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т.2. Вып.1. Ленинград: Наука. С. 31–35.
- Давыдова Н. Н. 1985. Диатомовые водоросли-индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л.: Наука. Ленингр. отделение.
- Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю., Мейдус А.В. и др. 2020. Следы Тунгусского события 1908 г. в донных осадках озера Заповедное по данным сканирующего РФА СИ. Доклады РАН. Науки о Земле 492(2): 61–65.
- Жузе А.П., Прошкина-Лавренко А.И., Шешукова-Порецкая В.С. 1974. Методика исследования. В: Глезер З.И., Жузе А.П., Макарова И.В. и др. (ред.). Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т.1., Л.: Наука, С. 50–79.
- Забелина М.М., Киселев И.А., Прошкина-Лавренко А.И. и др. 1951. Определитель пресноводных водорослей СССР. Выпуск 4. Диатомовые водоросли. Москва: «Советская наука».
- Каган Л.Я. 2012. Диатомовые водоросли Евро-Арктического региона. Аннотированная коллекция. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН.
- Лудикова А.В., Баумер М., Федоров Г.Б. и др. 2021. Палеолимнология оз. Большого щучьего (Полярный Урал) в позднем плейстоцене-голоцене по данным диатомового анализа. В: Материалы II Всероссийской научной конференции «Пути эволюции и географии», посвящённой памяти профессора А.А. Величко. Москва, С. 202–206.
- Новиков В.С., Дарьин А.В., Рогозин Д.Ю. 2023. Возможный след Тунгусского катастрофического события

1908 г. в донных осадках озера Пеюнга по данным сканирующего микро-РФА. В: Минералы: строение, свойства, методы исследования: материалы XIII Всероссийской молодежной научной конференции (Екатеринбург, 29 мая-2 июня 2023. – Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, С. 222–223.

Рогозин Д.Ю., Дарьин А.В., Калугин И.А. и др. 2017. Оценка скорости накопления донных отложений в озере Чеко (Эвенкия, Сибирь): новые сведения по проблеме Тунгусского феномена 1908 года. Докл. АН. Науки о Земле 476(6): 685–687. DOI: [10.7868/S0869565217300181](https://doi.org/10.7868/S0869565217300181)

Рогозин Д.Ю., Крылов П.С., Даутов А.Н. и др. 2023. Морфология озер Центрально-Тунгусского плато (Красноярский Край, Эвенкия): новые сведения по проблеме Тунгусской катастрофы 1908 года. Доклады РАН. Науки о Земле 510(1): 81–85. DOI: [10.31857/S2686739722602861](https://doi.org/10.31857/S2686739722602861)

Слуковский З.И., Шелехова Т.С., Сыроежко Е.В. 2018. Отклик диатомовой флоры малого озера на воздействие тяжелых металлов в условиях урбанизированной среды Республики Карелии. Вестник СПбГУ. Науки о Земле 63(1): 103–124. DOI: [10.21638/11701/spbu07.2018.106](https://doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.106)

Стенина А.С. 2009. Диатомовые водоросли (Bacillariophyta) в озерах востока Большеземельской тундры. Сыктывкар.

Трифонов И.С. 1990. Экология и сукцессия озерного фитопланктона. Ленинград: Изд-во Наука.

Camburn K.E., Charles D.F. 2000. Diatoms of Low-Alkalinity Lakes in the Northeastern United States Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Special Publication 18.

Grimm E. 2004. Tilia software 2.0.2. Springfield, Illinois State Museum Research and Collection Center.

Guiry M.D., Guiry G.M. 2025. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. URL: <https://www.algaebase.org> (searched on 1 August 2025)..

Hausmann S., Pienitz R. 2009. Seasonal water chemistry and diatom changes in six boreal lakes of the Laurentian Mountains (Quebec, Canada): impacts of climate and timber harvesting. Hydrobiologia 635: 1–14. DOI: [10.1007/s10750-009-9855-0](https://doi.org/10.1007/s10750-009-9855-0)

Krammer K., Lange-Bertalot H. 1986–1991. Bacillariophyceae. In: Ettl H., Gerloff J., Heynig H. et al. (Eds.), Süßwasserflora von Mitteleuropa, Vol.2. (T.1–4). Stuttgart/Jena: Gustav Fischer Verlag.

Kützing F.T. 1844. Die kieselschaligen Bacillarien oder Diatomeen. Nordhausen.

Lange-Bertalot H. 2001. Diatoms of Europe: diatoms of the European inland waters and comparable habitats. Navicula sensu stricto. 10 Genera separated from Navicula sensu lato. Frustulia. A.R.G. Gantner Verlag. K.G., Vol. 2.

Lange-Bertalot H., Fuhrmann A. 2017. Diploneis lecohuiana sp. nov., D. fereparma sp. n. and D. parma Cleve: rare diatoms (Bacillariophyta) in Central European freshwater. Nova Hedwigia Beiheft 146: 33–42.

Martin J., Head. 2019. Formal subdivision of the Quaternary System/Period: Present status and future directions. Quaternary International 500: 32–51. DOI: [10.1016/j.quaint.2019.05.018](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.05.018)

Patrick R.M., Reimer C.W. 1966. The Diatoms of the United States exclusive of Alaska and Hawaii, V. 1 Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 13.

Rogozin D.Y., Nazarova L.B., Rudaya N.A. et al. 2025. Tracking Late Holocene climate change and the 1908 Tunguska impact event from lake sediments in Central Siberia. Quaternary Research 125: 1–19. DOI: [10.1017/qua.2024.35](https://doi.org/10.1017/qua.2024.35)

Rühland K., Priesnitz A., Smol J.P. 2003. Paleolimnological Evidence from Diatoms for Recent Environmental Changes in 50 Lakes across Canadian Arctic Treeline. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 35: 110–123

Sorensen T. 1948. A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species and its application to analyses of the vegetation on Danish commons. Biologiske Skrifter 5: 1–34.

Watchorn M.A., Hamilton P.B., Anderson T.W. 2008. Diatoms and pollen as indicators of water quality and land-use change: a case study from the Oak Ridges Moraine, Southern Ontario, Canada. Journal of Paleolimnology 39: 491–509. DOI: [10.1007/s10933-007-9126-x](https://doi.org/10.1007/s10933-007-9126-x)