

Fluxes and composition of sediment particles in the water column of Southern Lake Baikal between 1999 and 2021

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYVologina E.G.^{1*}, Sturm M.², Budnev N.M.³¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Lermontov Str., 128, Irkutsk, 664033, Russia² Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, CH-8600 Dübendorf, Switzerland³ Irkutsk State University, K. Marx Str., 1, Irkutsk, 664003, Russia

ABSTRACT. This study investigates in detail natural processes of modern sedimentation in South Baikal. The article presents data on the total flux of sedimentary matter, collected between March 1999 and March 2021. The quantity and composition of the recovered material is largely determined by $\text{SiO}_{2\text{bio}}$, which is directly dependent on annual blooms of diatoms in the lake. Since 2010, particle fluxes have generally increased. At the same time, there was a change in the dominant diatom species. So called "Melosira years" were replaced by years with increased productivity of species of the genus *Synedra*. Presumably, this happened due to climate change.

Keywords: Lake Baikal, sediment traps, fluxes of sedimentary matter, biogenic silica, diatoms, bottom sediments

For citation: Vologina E.G., Sturm M., Budnev N.M. Fluxes and composition of sediment particles in the water column of Southern Lake Baikal between 1999 and 2021 // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 505-514. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-505

1. Introduction

Diatom valves are important components of Baikal sediments and are widely used to reconstruct the past environment of the lake (Bradbury et al., 1994; Grachev et al., 1997; Mackay et al., 1998; Karabanov, 1999; Mackay et al., 2000; Khursevich et al., 2001; Kuzmin et al., 2009 and many others). Diatoms largely consist of biogenic silica ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$), the content of which in bottom sediments is directly proportional to the occurrence of diatoms. Accordingly, this indicator is widely used in paleoreconstructions (Grachev et al., 1997; Kuz'min et al., 2001; Karabanov et al., 2001 and many others).

Current sedimentation studies are essential in order to interpret paleoclimate conditions of sediment records as well as to determine the state of the lake in the context of modern climate change on the planet. Accordingly, it is very important to study the sediment particles in the water column over a longer time period, using sediment traps, which are deployed at different water depths of the lake.

The article presents results of the study of sedimentary material collected by sediment traps from March 1999 to March 2021 in South Baikal in the area of the Baikal Neutrino Telescope. They add to already

published data (Sturm et al., 2015; Vologina et al., 2022).

The research was carried out within the framework of a scientific cooperation agreement between the Institute of the Earth's Crust SB RAS (IEC SB RAS), Irkutsk State University (ISU) and the Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology (EAWAG).

2. Material and methods

Sediment particles were sampled using cylindrical sediment traps placed at a buoy station in the Southern Basin of Lake Baikal near the Baikal Neutrino Telescope (Fig. 1). The coordinates of the station are 51°46.076' N, 104°24.948' E. The work was carried out almost continuously from March 1999 to March 2021. The sampling periods are given in Table 1. In different years, 10 to 18 traps were installed at depths from 50 to 1363 m (Vologina et al., 2022).

The collected material was freeze-dried on an FD ALPHA device and weighed on an analytical balance. Biogenic silica ($\text{SiO}_{2\text{bio}}$) was determined in samples collected in 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2015, 2016, 2017 and 2018. The analysis was carried out at the

*Corresponding author.

E-mail address: vologina@crust.irk.ru (E.G. Vologina)

Received: July 25, 2025; **Accepted:** August 10, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



Swiss Federal Institute of Environmental Science and Technology using the method described in (Ohlendorf and Sturm, 2008). Total sedimentary matter fluxes and $\text{SiO}_{2\text{bio}}$ fluxes were calculated in grams per 1 m^2 per year ($\text{g/m}^2/\text{year}$).

The qualitative composition of particles was determined in smear-slides using a SK14 binocular microscope with magnification of $100\times$ and $400\times$.

3. Results

Examination of smear slides shows that the samples contain both terrigenous and biogenic material. The terrigenous part of the samples is represented by clay particles, mica-clay aggregates and single mineral grains of silt size. Rare allochthonous biogenic material includes pollen particles and terrestrial plant remains. The biogenic part of the samples consists mainly of diatom valves. Amphipods of the genus *Gammarus* and their fragments are sometimes observed within the traps, as well as sponge spicules and other undefined particles. Amphipods were removed from the trap containers immediately after collection. The same applies to small fish, which are sometimes (very rarely) observed in traps. The diatom composition mainly included spe-

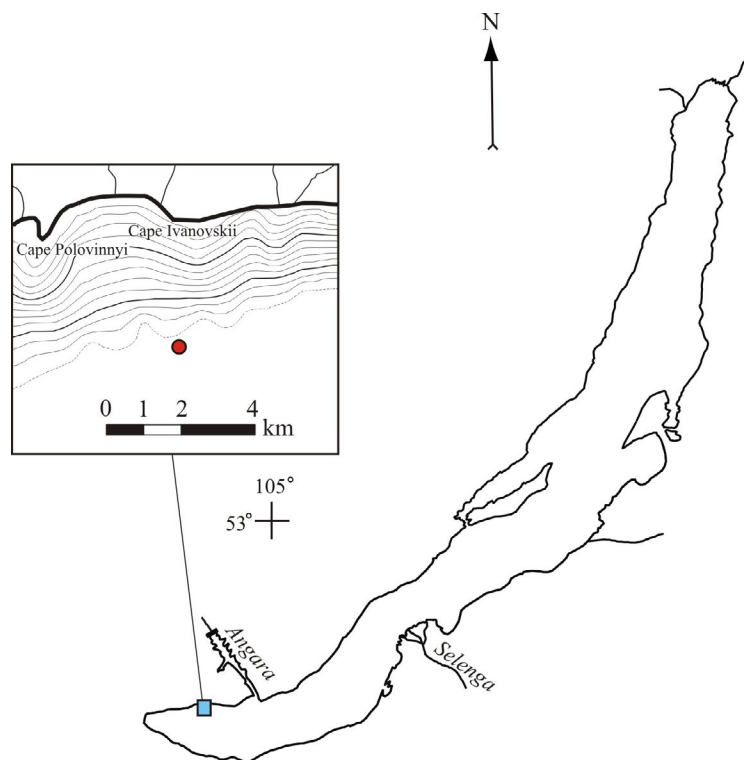


Fig.1. Map of Lake Baikal and location of the mooring site (red point).

Table 1. Composition of the most abundant diatoms in sedimentary material collected by sediment traps and average values of total annual fluxes of matter from 1999 to 2021

Years	Sampling period	Diatoms (genuses)	TAF*, $\text{g/m}^2/\text{y}$
1999	11.03.1999–06.03.2000	<i>Cyclotella</i> dominates, few <i>Aulacoseira</i> , single cells of <i>Synedra</i>	121
2000	09.03.2000–08.03.2001	<i>Aulacoseira</i> dominates, there are <i>Cyclotella</i> and <i>Synedra</i>	162
2001	09.03.2001–07.03.2002	<i>Cyclotella</i> dominates, there are <i>Synedra</i> and <i>Aulacoseira</i>	61.3
2002	08.03.2002–09.03.2003	<i>Synedra</i> and <i>Aulacoseira</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i>	127
2003	11.03.2003–08.03.2004	<i>Synedra</i> and <i>Cyclotella</i> , less <i>Aulacoseira</i>	52.2
2004	11.03.2004–07.03.2005	<i>Cyclotella</i> dominates, there is <i>Aulacoseira</i> , less <i>Synedra</i>	31.2
2005	08.03.2005–06.03.2006	<i>Cyclotella</i> , less <i>Aulacoseira</i> and <i>Synedra</i>	38.9
2006	12.03.2006–07.03.2007	<i>Cyclotella</i> dominates, there is <i>Aulacoseira</i> , less <i>Synedra</i>	11.5
2007	11.03.2007–05.03.2008	<i>Synedra</i> and <i>Aulacoseira</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i>	120
2008	09.03.2008–05.03.2009	<i>Synedra</i> dominates, many <i>Cyclotella</i> , less <i>Aulacoseira</i>	70.7
2009	08.03.2009–05.03.2010	<i>Cyclotella</i> , <i>Synedra</i> and <i>Aulacoseira</i>	30.8
2010	14.03.2010–07.03.2011	<i>Synedra</i> dominates, there are <i>Aulacoseira</i> and <i>Cyclotella</i>	132
2011	09.03.2011–09.03.2012	<i>Synedra</i> dominates, there are <i>Aulacoseira</i> and <i>Cyclotella</i>	31.9
2012	11.03.2012–09.03.2013	<i>Synedra</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i> , less <i>Aulacoseira</i>	113
2013	10.03.2013–09.03.2014	<i>Synedra</i> and <i>Aulacoseira</i> dominates, few <i>Cyclotella</i>	56.0
2014	11.03.2014–15.03.2015	<i>Synedra</i> dominates, few <i>Cyclotella</i> and <i>Aulacoseira</i>	208
2015	07.03.2015–05.03.2016	<i>Synedra</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i> , single cells of <i>Aulacoseira</i>	96.3
2016	07.03.2016–07.03.2017	<i>Synedra</i> dominates, few <i>Cyclotella</i> , single cells of <i>Aulacoseira</i>	69.6
2017	08.03.2017–06.03.2018	<i>Synedra</i> dominates, few <i>Cyclotella</i> , single cells of <i>Aulacoseira</i>	147
2018	08.03.2018–05.03.2019	<i>Synedra</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i> , single cells of <i>Aulacoseira</i>	63.4
2019	06.03.2019–04.03.2020	<i>Synedra</i> dominates, there is <i>Cyclotella</i> , less <i>Aulacoseira</i>	36.0
2020	06.03.2020–17.03.2021	<i>Synedra</i> dominates, few <i>Cyclotella</i> and <i>Aulacoseira</i>	190

* Total annual fluxes

Note: the lines corresponding to the values of the TAF $> 100 \text{ g/m}^2/\text{y}$ are highlighted in yellow

cies of the genera *Aulacoseira*, *Synedra* and *Cyclotella*. Single valves of benthic diatoms are also found. Content and dominant species of diatoms vary in different years (Table 1). It is noteworthy that the diatom assemblages of the trap material from different depths are usually similar in the individual years.

Table 1 shows the average amount of total annual fluxes of sedimentary matter (TAF) from 1999 to 2021. A minimum value of TAF (11.5 g/m²/year) was recorded in 2006 and a maximum value (208 g/m²/year) in 2014. The average TAF value for the study period was 89.6 g/m²/year. In general values of TAF increased since the year 2010. Thus, from March 1999 to March 2010, they averaged 75.1 g/m²/year, whereas they valued from March 2010 to March 2021 104 g/m²/year (Vologina et al., 2022). It is noteworthy that periods with peak values of TAF (e.g. more than 100 g/m²/year) correspond to different dominant species of diatoms. Species of the genus *Cyclotella* dominated the year 1999, species of *Aulacoseira* the year 2000, whereas species of *Aulacoseira* and *Synedra* dominated the years 2002 and 2007. Since 2010, only specie of *Synedra* have dominated the diatom assemblage (Table 1).

It was shown that the fluxes of particles in the sediment traps in Lake Baikal are largely determined by SiO_{2bio} (Vologina and Sturm, 2017). This is clearly illustrated in Figure 2, which shows total fluxes of sedimentary matter and fluxes of SiO_{2bio} at different water depths of the Southern Basin of Lake Baikal during the years 2015, 2016, 2017 and 2018. These values correlate well with each other, showing minimum values in 2018 and maximum values in 2017 (Fig. 2). The maximum average values of SiO_{2bio} fluxes of 81.7, 82.3 and 98.9 g/m²/year were recorded in 1999, 2000 and 2017. In these years, elevated average values of TAF were also recorded showing 121 g/m²/year, 162 g/m²/year and 147 g/m²/year (Fig. 3). On the other hand, the minimum average values of SiO_{2bio} fluxes (7.47 g/m²/year and 3.58 g/m²/year) also correspond to the minimum average values of TAF (38.9 and 11.5 g/m²/year) in 2005 and 2006, respectively (Fig. 3).

4. Discussion

Diatoms are an important component of plankton of Lake Baikal. During productive years, their numbers can reach 90% of the total plankton. During average years this number decreases by two to three times (Popovskaya et al.,). Sediment trap experiments conducted in South Baikal from 1999 to 2021 showed that the fluxes of sediment particles directly depend on the abundance of diatoms in the water column of Lake Baikal. During diatom blooms, TAF values also increase significantly (Vologina and Sturm, 2017). The homogeneous composition of diatoms observed at different depths of the lake water column in individual years is explained by aggregation of single cells, which leads to increased sinking rates of up to 60 m per day from the productive zone of the epilimnion down to the bottom of the lake (Mackay et al., 2000; Ryves et al., 2003; Sturm et al., 2015).

Biogenic silica is a component of diatom valves and sponge spicules. However, the content of sponge spicules in the water column and bottom sediments is insignificant, so SiO_{2bio} concentrations mainly reflect the total amount of diatoms. SiO_{2bio} fluxes are directly proportional to the fluxes of sedimentary material and depend on diatom blooms (Fig. 2, 3).

An increase of TAF has been observed in the sediment trap samples since 2010 (Vologina et al., 2022). At the same time, a change in the dominant genera of diatoms occurred (Table 1). Species of the genera *Cyclotella* and *Aulacoseira* prevailed in 1999 and 2000, respectively. 2000 was called a "Melosira year" showing a significant content of species of the genus *Melosira*, which was since renamed as the genus *Aulacoseira* (Evstafyev et al., 2010; Jewson and Granin, 2014; Vologina and Sturm, 2017). Diatoms of the genera *Aulacoseira* and *Synedra* prevailed the diatom composition in 2002 and 2007. Since 2010, just the genus *Synedra* was dominant, with peak values in 2010, 2012, 2014, 2017 and 2020. The species of this genus make up more than 94 % of the total population of diatoms. (Vologina et al., 2023).

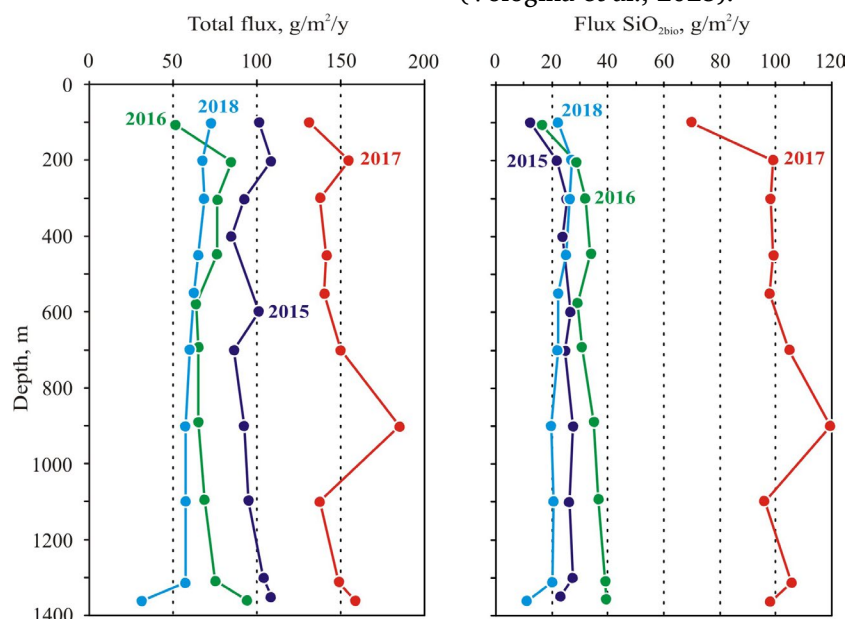


Fig.2. Total fluxes of sedimentary matter and fluxes of biogenic silica (SiO_{2bio}) at different water depths of the Southern Basin of Lake Baikal in 2015, 2016, 2017 and 2018.

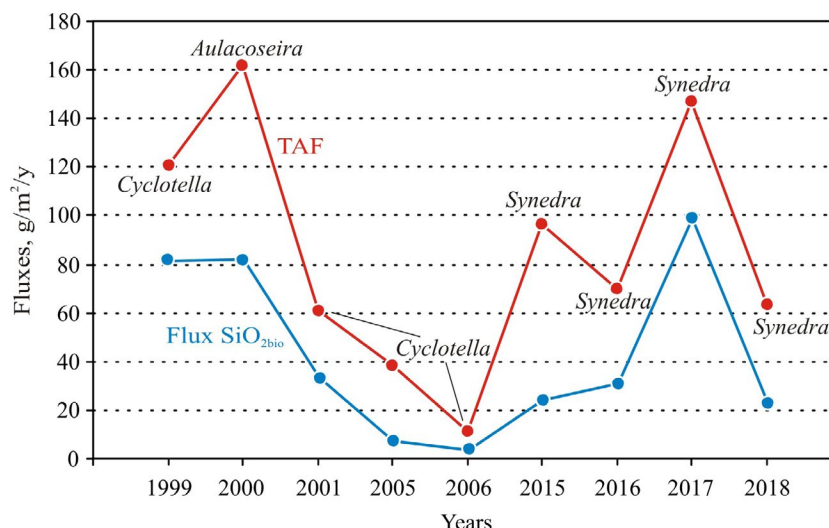


Fig.3. Average values of total annual fluxes of sedimentary matter (TAF) and annual fluxes of biogenic silica (SiO_{2bio}). Predominant genera of diatoms are indicated.

We assume the dominance of species of the genus *Synedra*, observed in the water column and surface sediments of southern Lake Baikal (Roberts et al., 2018; Vologina et al., 2019; Bondarenko et al., 2020; Vologina et al., 2020) to be a direct consequence of recent climate warming (Vologina et al., 2022; Vologina et al., 2023).

5. Conclusions

Biogenic silica, which built the skeletons of diatoms, is an important indicator of sedimentation and of environmental conditions in Lake Baikal. Monitoring of sedimentary matter fluxes, carried out from March 1999 to March 2021 in South Baikal in the area of the Baikal Neutrino Telescope, shows significant fluctuations in both SiO_{2bio} fluxes and total matter fluxes in general in different years. Moreover, the maximum flux values occur in the years of diatom bloom. An increase of TAF and a change in the dominant diatom species since 2010 are noted, which, in our opinion, is associated with climate change.

Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to the members of the expedition of Institute of Applied Physics ISU for invaluable assistance in carrying out the work. The authors are also deeply grateful to I. Brunner (EAWAG) and E.G. Polyakova (IEC SB RAS) for analytical work and assistance in preparing samples for analysis.

The study was carried out thanks to a long-term international cooperation with the support of EAWAG (project No. 85145), within the framework of the state task of IEC SB RAS (project No. 1025022500090-2-1.5.1-1.5.1) and the Russian Federation Ministry of Science and High Education (project No. FZZE-2023-0004). The equipment of the Central Collective Use Center "Geodynamics and Geochronology" of the IEC SB RAS was partially involved in the work.

Conflict of interest

The authors declare no competing interest.

References

- Bondarenko N.A., Vorobyova S.S., Zhuchenko N.A. et al. 2020. Current state of phytoplankton in the littoral area of Lake Baikal, spring 2017. *Journal of Great Lakes Research* 46: 17-28. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.001)
- Bradbury J.P., Bezrukova Ye.V., Chernyaeva G.P. et al. 1994. A synthesis of post-glacial diatom records from Lake Baikal. *Journal of Paleolimnology* 10: 213-252.
- Evstafyev V.K., Bondarenko N.A., Melnik N.G. 2010. Analysis of longterm dynamics in key components of the food web in deep-water Lake Baikal. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»* [Bulletin of the Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"] 3(1): 3-11. (in Russian)
- Grachev M.A., Likhoshwai Ye.V., Vorobieva S.S. et al. 1997. Signals of the paleoclimates of Upper Pleistocene in the sediments of Lake Baikal. *Geologiya i Geofizika* [Geology and Geophysics] 38(5): 957-980. (in Russian)
- Jewson D.H., Granin N.G. 2014. Cyclical size change and population dynamics of a planktonic diatom, *Aulacoseira baicalensis*, in Lake Baikal. *European Journal of Phycology* 50(1): 1-19. DOI: [10.1080/09670262.2014.979450](https://doi.org/10.1080/09670262.2014.979450)
- Karabanov E.B., Prokopenko A.A., Kuz'min M.I. et al. 2001. Glacial and interglacial periods of Siberia: the Lake Baikal paleoclimatic record and correlation with West Siberian stratigraphic scheme (the Brunhes Chron). *Geologiya i Geofizika* [Russian Geology and Geophysics] 42(1): 41-54. (in Russian)
- Karabanov E.B. 1999. Geological structure of the Baikal sediment and reconstructions of climatic changes in Central Asia during the Late Cenozoic. ScD thesis. Moscow, Russia. (in Russian)
- Khursevich G.K., Karabanov E.B., Prokopenko A.A. et al. 2001. Detailed diatom biostratigraphy of Baikal sediments during the Brunhes Chron and climatic factors of species formation. *Geologiya i Geofizika* [Russian Geology and Geophysics] 42(1-2): 108129. (in Russian)
- Kuz'min M.I., Karabanov E.B., Kawai T. et al. 2001. Deep drilling on Lake Baikal: main results. *Geologiya i Geofizika* [Russian Geology and Geophysics] 42(1): 8-34. (in Russian)

Kuz'min M.I., Khursevich G.K., Prokopenko A.A. et al. 2009. Centric Diatom Algae of Baikal in the Late Cenozoic: Morphology, Systematics, Stratigraphic Occurrence, and Stages of Evolution (from Deep-Water Drilling Data). Novosibirsk: Akad. Izd. "Geo".

Mackay A.W., Flower R.J., Kuzmina A.E. et al. 1998. Diatom succession trends in recent sediments from Lake Baikal and their relationship to atmospheric pollution and to climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 353: 1011-1055.

Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J. et al. 2000. The deposition and accumulation of endemic planktonic diatoms in the sediments of Lake Baikal and an evaluation of their potential role in climate reconstruction during the Holocene. *Terra Nostra* 9: 34-48.

Ohlendorf C., Sturm M. 2008. A modified method for biogenic silica determination. *Journal of Paleolimnology*, 54: 137-142.

Popovskaya G.I., Genkal S.I., Likhoshway Ye.V. 2002. Diatoms of the plankton of Lake Baikal. Novosibirsk: Nauka.

Roberts S., Swann G.E.A., McGowan S. et al. 2018. Diatom evidence of 20th century ecosystem change in Lake Baikal, Siberia. *PLOS ONE* 13(12): e0213413. DOI: [10.1371/journal.pone.0208765](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208765)

Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M. et al. 2003. Quantitative and qualitative relationships between planktonic diatom communities and diatom assemblages in sedimenting material and surface sediments in Lake Baikal, Siberia. *Limnology and Oceanography* 48(4): 1643-1661.

Sturm M., Vologina E.G., Budnev N.M. et al. 2015. Results of 20 years of sediment trap monitoring. Particle dynamics in ocean-like Lake Baikal. In: 9th Symposium for European Freshwater Sciences «Freshwater sciences coming home», pp. 165.

Vologina E.G., Sturm M. 2017. Particulate fluxes in South Baikal: evidence from sediment trap experiments. *Russian Geology and Geophysics* 58: 1045-1052. DOI: [10.15372/GiG20170904](https://doi.org/10.15372/GiG20170904)

Vologina E.G., Sturm M., Budnev N.M. 2019. The results of experiments with sediment traps in South Baikal from March 2013 to March 2015. In: XXIII International Scientific Conference (School) on marine geology "Geology of the seas and oceans", pp. 20-24.

Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S. et al. 2020. Late Holocene sediments in the profound abyss of Southern Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 585-587. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-585](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-585)

Vologina E.G., Sturm M., Budnev N.M. 2022. Results of long-term measurements of particulate matter in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 193-196. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-193](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-193)

Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S. 2023. Fluxes and Composition of Particulate Matter in the Water Column of South Baikal (between March 2015 and March 2016) *Russian Geology and Geophysics* 64: 452-461. DOI: [10.2113/RGG20224476](https://doi.org/10.2113/RGG20224476)

Потоки и состав осадочных частиц в водной толще Южного Байкала с 1999 по 2021 гг.



Вологина Е.Г.^{1*}, Штурм М.², Буднев Н.М.³

¹ Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033, Россия

² Швейцарский федеральный институт науки и технологии окружающей среды, Дюбендорф, CH-8600, Швейцария

³ Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, 1, Иркутск, 664003, Россия

АННОТАЦИЯ. Детально исследованы процессы современного осадконакопления в Южном Байкале. В статье представлены данные об общих потоках осадочного материала, собранные с марта 1999 г. по март 2021 г. Количество и состав извлеченного материала во многом определяется $\text{SiO}_{2\text{био}}$, который напрямую зависит от ежегодного цветения диатомовых водорослей в озере. С 2010 г. потоки частиц в целом возросли. Одновременно с этим произошла смена доминирующих видов диатомей. Так называемые “мелозирные годы” сменились годами с повышенной урожайностью видов рода *Synedra*. Предположительно это произошло в связи с изменением климата.

Ключевые слова: озеро Байкал, седиментационные ловушки, потоки осадочного вещества, биогенный кремнезем, диатомеи, донные осадки

Для цитирования: Вологина Е.Г., Штурм М., Буднев Н.М. Потоки и состав осадочных частиц в водной толще Южного Байкала с 1999 по 2021 гг. // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 505-514. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-505](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-505)

1. Введение

Створки диатомовых водорослей являются важными компонентами байкальских отложений и широко используются для проведения реконструкций окружающей среды в прошлом (Bradbury et al., 1994; Грачев и др., 1997; Mackay et al., 1998; Карабанов, 1999; Mackay et al., 2000; Хурсевич и др., 2001; Кузьмин и др., 2009 и многие другие). Диатомеи в значительной мере состоят из биогенного кремнезёма ($\text{SiO}_{2\text{био}}$), содержание которого в донных осадках прямо пропорционально их численности. Соответственно, этот показатель широко используется в палеореконструкциях (Грачев и др., 1997; Кузьмин и др., 2001; Карабанов и др., 2001 и многие другие).

Исследования современной седиментации имеют большое значение для интерпретации палеоклиматических условий, зафиксированных в осадочных записях, а также для определения состояния озера в контексте современных изменений климата на планете. В связи с этим крайне важно изучать осадочный материал в толще воды в течение длительного периода времени, используя седиментационные ловушки, размещаемые на разных глубинах озера.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: vologina@crust.irk.ru (Е.Г. Вологина)

Поступила: 25 июля 2025; Принята: 10 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

В статье приведены результаты исследования осадочного материала, отобранного седиментационными ловушками с марта 1999 г. по март 2021 г. в Южном Байкале в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа. Они дополняют уже опубликованные данные (Sturm et al., 2015; Vologina et al., 2022).

Исследования выполнялись в рамках соглашения о научном сотрудничестве между Институтом земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН), Иркутским государственным университетом (ИГУ) и Швейцарским федеральным институтом науки и технологии окружающей среды (EAWAG).

2. Материалы и методы

Отбор проб осадочного вещества осуществлялся с использованием цилиндрических седиментационных ловушек, размещённых на буйковой станции в Южной котловине озера Байкал в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа (Рис. 1). Координаты станции – 51°46.076' с.ш., 104°24.948' в.д. Работы проводились почти непрерывно с марта 1999 г. по март 2021 г. Периоды отбора проб приведены в Таблице 1. В разные годы

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



устанавливалось от 10 до 18 ловушек на глубинах от 50 до 1363 м (Vologina et al., 2022).

Отобранный материал был высушен посредством вымораживания (freeze-dried) на приборе FD ALPHA и взвешен на аналитических весах. В пробах, отобранных в 1999, 2000, 2001, 2005, 2006, 2015, 2016, 2017 и 2018 гг. определялся биогенный кремнезем. Анализ выполнялся в Швейцарском федеральном институте науки и технологии окружающей среды методом, описанным в (Ohlendorf and Sturm, 2008). Рассчитаны общие потоки осадочного вещества и потоки $\text{SiO}_{2\text{био}}$ в граммах на 1 м^2 в год ($\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$).

Качественный состав частиц определялся в препаратах-мазках (smear-slides) на бинокулярном микроскопе SK14 с увеличением $100\times$ и $400\times$.

3. Результаты

Просмотр препаратов-мазков (smear-slides) свидетельствует о том, что в пробах присутствует как терригенный, так и биогенный материал.

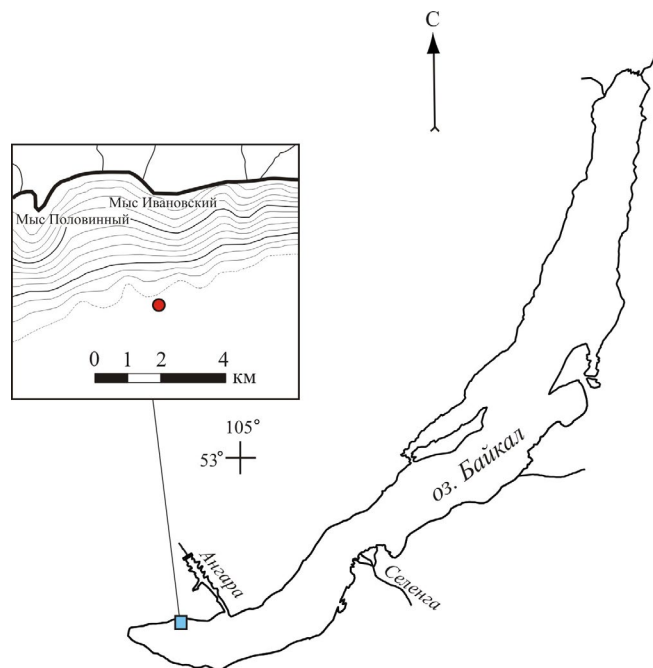


Рис.1. Карта озера Байкал и местоположение буйковой станции (красная точка).

Таблица 1. Состав наиболее часто встречаемых диатомей в осадочном материале, отобранном седиментационными ловушками, и средние значения общих годовых потоков вещества с 1999 по 2021 гг.

Годы	Период отбора проб	Диатомеи (рода)	ОГП*, $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$
1999	11.03.1999–06.03.2000	<i>Cyclotella</i> доминирует, незначительное количество <i>Aulacoseira</i> , единичные створки <i>Synedra</i>	121
2000	09.03.2000–08.03.2001	<i>Aulacoseira</i> доминирует, отмечаются <i>Cyclotella</i> и <i>Synedra</i>	162
2001	09.03.2001–07.03.2002	<i>Cyclotella</i> доминирует, отмечаются <i>Synedra</i> и <i>Aulacoseira</i>	61.3
2002	08.03.2002–09.03.2003	<i>Synedra</i> и <i>Aulacoseira</i> доминируют, отмечается <i>Cyclotella</i>	127
2003	11.03.2003–08.03.2004	<i>Synedra</i> и <i>Cyclotella</i> , реже <i>Aulacoseira</i>	52.2
2004	11.03.2004–07.03.2005	<i>Cyclotella</i> доминирует, отмечается <i>Aulacoseira</i> , реже <i>Synedra</i>	31.2
2005	08.03.2005–06.03.2006	<i>Cyclotella</i> , реже <i>Aulacoseira</i> и <i>Synedra</i>	38.9
2006	12.03.2006–07.03.2007	<i>Cyclotella</i> доминирует, отмечается <i>Aulacoseira</i> , реже <i>Synedra</i>	11.5
2007	11.03.2007–05.03.2008	<i>Synedra</i> и <i>Aulacoseira</i> доминируют, отмечается <i>Cyclotella</i>	120
2008	09.03.2008–05.03.2009	<i>Synedra</i> доминирует, много <i>Cyclotella</i> , реже <i>Aulacoseira</i>	70.7
2009	08.03.2009–05.03.2010	Отмечаются <i>Cyclotella</i> , <i>Synedra</i> и <i>Aulacoseira</i>	30.8
2010	14.03.2010–07.03.2011	<i>Synedra</i> доминирует, отмечаются <i>Aulacoseira</i> и <i>Cyclotella</i>	132
2011	09.03.2011–09.03.2012	<i>Synedra</i> доминирует, отмечаются <i>Aulacoseira</i> и <i>Cyclotella</i>	31.9
2012	11.03.2012–09.03.2013	<i>Synedra</i> доминирует, отмечается <i>Cyclotella</i> , реже <i>Aulacoseira</i>	113
2013	10.03.2013–09.03.2014	<i>Synedra</i> и <i>Aulacoseira</i> доминируют, незначительное количество <i>Cyclotella</i>	56.0
2014	11.03.2014–15.03.2015	<i>Synedra</i> доминирует, незначительное количество <i>Cyclotella</i> и <i>Aulacoseira</i>	208
2015	07.03.2015–05.03.2016	<i>Synedra</i> доминирует, отмечается <i>Cyclotella</i> , единичные створки <i>Aulacoseira</i>	96.3
2016	07.03.2016–07.03.2017	<i>Synedra</i> доминирует, незначительное количество <i>Cyclotella</i> , единичные створки <i>Aulacoseira</i>	69.6
2017	08.03.2017–06.03.2018	<i>Synedra</i> доминирует, незначительное количество <i>Cyclotella</i> , единичные створки <i>Aulacoseira</i>	147
2018	08.03.2018–05.03.2019	<i>Synedra</i> доминирует, отмечается <i>Cyclotella</i> , единичные створки <i>Aulacoseira</i>	63.4
2019	06.03.2019–04.03.2020	<i>Synedra</i> доминирует, отмечается <i>Cyclotella</i> , реже <i>Aulacoseira</i>	36.0
2020	06.03.2020–17.03.2021	<i>Synedra</i> доминирует, незначительное количество <i>Cyclotella</i> и <i>Aulacoseira</i>	190

* Общий годовой поток

Примечание: жёлтым цветом выделены строки, соответствующие ОГП $> 100 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$.

Терригенная часть проб представлена глинистым веществом, слюдисто-глинистыми агрегатами и единичными минеральными зёрнами алевритовой размерности. Редкий аллохтонный биогенный материал включает частицы пыли и наземные растительные остатки. Биогенная часть проб состоит главным образом из створок диатомей. В ловушках иногда встречаются рачки-бокоплавы рода *Gammarus* и их фрагменты, а также спикулы губок и другие неопределённые частицы. Бокоплавы извлекались из ловушек сразу после отбора. То же самое относилось и к мелким рыбам, которые крайне редко наблюдаются в ловушках. В составе диатомей преобладали виды родов *Aulacoseira*, *Synedra* и *Cyclotella*. Изредка встречались также створки бентосных диатомовых водорослей. Содержания и доминирующие виды диатомей варьируют в разные годы (Таблица 1). Примечательно, что в отдельно взятые годы состав диатомей в осадочном материале, отобранном с разных глубин, в целом аналогичен.

В Таблице 1 приведены средние значения общих годовых потоков (ОГП) осадочного вещества с 1999 по 2021 год. Минимальные значения ОГП ($11.5 \text{ г/м}^2/\text{год}$) отмечаются в 2006 г., максимальные ($208 \text{ г/м}^2/\text{год}$) – в 2014 г., средняя величина ОГП за период исследования составила $89.6 \text{ г/м}^2/\text{год}$. В целом ОГП увеличились с 2010 г. С марта 1999 г. по март 2010 г. они составляли в среднем $75.1 \text{ г/м}^2/\text{год}$, а с марта 2010 г. по март 2021 г. – $104 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (Vologina et al., 2022). Следует отметить, что периодам с пиковыми значениями ОГП (более $100 \text{ г/м}^2/\text{год}$) соответствуют различные доминирующие виды диатомей. Так, в 1999 г. доминировали виды рода *Cyclotella*, в 2000 г. – *Aulacoseira*, в 2002 г. и в 2007 г. – *Aulacoseira* и *Synedra*. С 2010 г. в составе диатомей доминирует только виды рода *Synedra* (Таблица 1).

Установлено, что потоки частиц в седиментационных ловушках озера Байкал в значительной

степени определяются $\text{SiO}_{26\text{ию}}$ (Вологина и Штурм, 2017). Этот вывод хорошо иллюстрирует рисунок 2, где приведены общие потоки осадочного вещества и потоки $\text{SiO}_{26\text{ию}}$ на разных глубинах Южной котловины Байкала в 2015, 2016, 2017 и 2018 годах. Эти величины хорошо коррелируют между собой, показывая минимальные значения в 2018 г. и максимальные – в 2017 г. (Рис. 2). Максимальные средние значения потоков $\text{SiO}_{26\text{ию}}$ (81.7 , 82.3 , $98.9 \text{ г/м}^2/\text{год}$) отмечались в 1999, 2000 и 2017 гг. В эти годы наблюдались также повышенные средние величины ОГП – 121 , 162 и $147 \text{ г/м}^2/\text{год}$ соответственно (Рис. 3). Напротив, минимальным средним значениям потоков $\text{SiO}_{26\text{ию}}$ (7.47 и $3.58 \text{ г/м}^2/\text{год}$) соответствуют минимальные средние величины ОГП (38.9 и $11.5 \text{ г/м}^2/\text{год}$) в 2005 г. и 2006 г. соответственно (Рис. 3).

4. Обсуждение

Диатомовые водоросли являются важной составляющей планктона озера Байкал. В продуктивные годы их численность может достигать 90 % от общего количества планктона. В обычные годы эта величина снижается в 2–3 раза (Поповская и др., 2002). Эксперименты с седиментационными ловушками, проведённые нами в Южном Байкале с 1999 по 2021 гг., показали, что потоки осадочного вещества напрямую зависят от обилия диатомей в водной толще озера. В периоды цветения диатомовых водорослей значения ОГП значительно увеличиваются (Вологина и Штурм, 2017). Однородный состав диатомей, отмеченный на разных глубинах водной толщи озера в отдельные годы, объясняется агрегацией отдельных клеток, что приводит к увеличению скорости их осаждения до 60 м в сутки из продуктивной зоны эпилимниона до дна озера (Mackay et al., 2000; Ryves et al., 2003; Sturm et al., 2015).

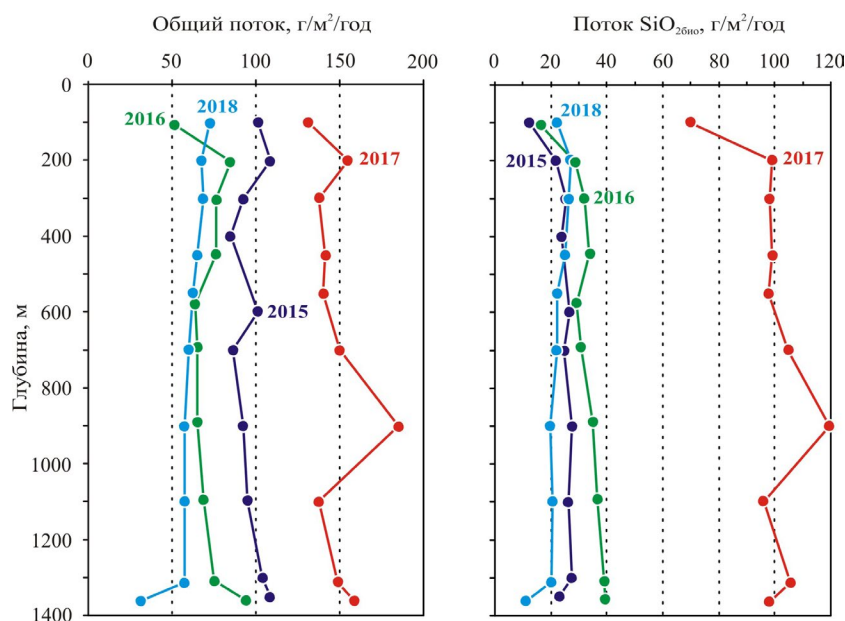


Рис.2. Общие потоки осадочного вещества и потоки биогенного кремнезёма ($\text{SiO}_{26\text{ию}}$) на разных глубинах Южной котловины Байкала в 2015, 2016, 2017 и 2018 годах.

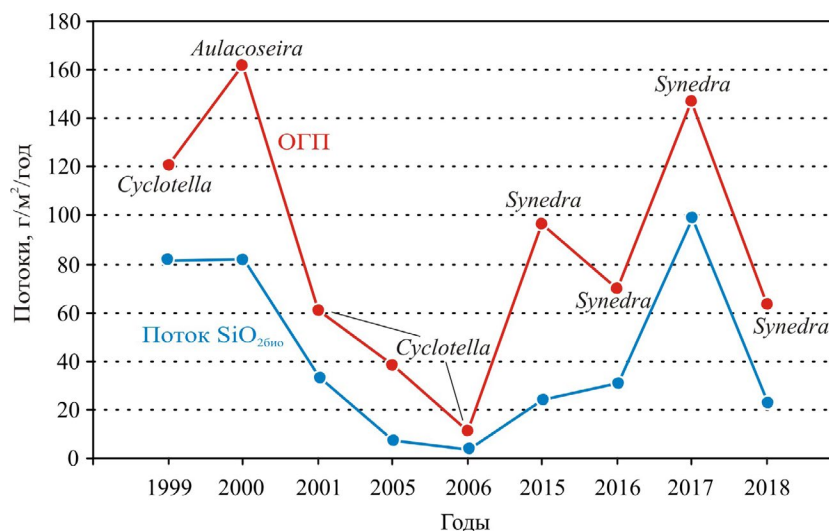


Рис. 3. Средние значения общих годовых потоков (ОГП) и годовых потоков биогенного кремнезёма ($\text{SiO}_{2\text{био}}$). Указаны доминирующие рода диатомей.

Биогенный кремнезём входит в состав створок диатомей и спикул губок. Однако содержание спикул губок в водной толще и в донных осадках незначительное, поэтому концентрации $\text{SiO}_{2\text{био}}$ отражают главным образом суммарное количество диатомей. Потоки $\text{SiO}_{2\text{био}}$ прямо пропорциональны потокам осадочного материала и напрямую зависят от цветения диатомей (Рис. 2, 3).

Установлено увеличение ОГП с 2010 г. (Vologina et al., 2022). Одновременно с этим произошла смена доминирующих родов диатомей (Таблица 1). Виды родов *Cyclotella* и *Aulacoseira* преобладали в 1999 г. и 2000 г. соответственно. 2000 год был «мелозирным годом» со значительным содержанием видов рода *Melosira* (в настоящее время переименован в род *Aulacoseira*) (Евстафьев и др., 2010; Jewson and Granin, 2014; Вологина и Штурм, 2017). *Aulacoseira* и *Synedra* представляли пики диатомей в 2002 г. и в 2007 г. С 2010 г. только род *Synedra* является доминирующим с пиковыми значениями в 2010, 2012, 2014, 2017 и 2020 гг. Содержание видов этого рода может составлять более 94 % от общего содержания диатомей (Вологина и др., 2023).

Мы предполагаем, что доминирование видов рода *Synedra*, наблюдаемое в водной толще и в поверхностных донных осадках Южного Байкала (Roberts et al., 2018; Вологина и др., 2019; Bondarenko et al., 2020; Vologina et al., 2020) является прямым следствием современного потепления климата (Vologina et al., 2022; Вологина и др., 2023).

5. Заключение

Биогенный кремнезём, слагающий скелеты диатомей, является важным индикатором осадконакопления и условий окружающей среды в озере Байкал. Мониторинг потоков осадочного вещества, проведённый с марта 1999 г. по март 2021 г. в Южном Байкале в районе расположения Байкальского нейтринного телескопа показывает значительные колебания как потоков $\text{SiO}_{2\text{био}}$, так общих потоков вещества в целом в разные годы. При этом максимальные значения потоков приходится

на годы цветения диатомей. Отмечается увеличение ОГП и смена доминирующих видов диатомей с 2010 г., связанная на наш взгляд с изменением климата.

Благодарности

Авторы искренне благодарны участникам экспедиции Института прикладной физики ИГУ за неоценимую помощь в проведении работ. Мы глубоко признательны И. Брюннер (EAWAG) и Е.Г. Поляковой (ИЗК СО РАН) за аналитическую работу и помощь в подготовке проб для анализов.

Исследование выполнено благодаря многолетнему международному сотрудничеству при поддержке EAWAG (проект № 85145), в рамках государственного задания ИЗК СО РАН (проект № 1025022500090-2-1.5.1-1.5.1) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZZE-2023-0004). В работе частично задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Вологина Е.Г., Штурм М. 2017. Потоки осадочного вещества в Южном Байкале. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками. Геология и геофизика 58 (9): 1314–1323. DOI: [10.15372/GiG20170904](https://doi.org/10.15372/GiG20170904)
- Вологина Е.Г., Штурм М., Буднев Н.М. 2019. Результаты экспериментов с седиментационными ловушками в Южном Байкале с марта 2013 г. по март 2015 г. Материалы XXIII Международной научной конференции (школы) по морской геологии «Геология морей и океанов» 3: 20-24.
- Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С. 2023. Потоки и состав осадочного вещества в водном столбе Южного Байкала (с марта 2015 по март 2016 г.). Геология и геофизика 64(4): 547–558. DOI: [10.15372/GiG2022129](https://doi.org/10.15372/GiG2022129)

Грачев М.А., Лихошвай Е.В., Воробьева С.С. и др. 1997. Сигналы палеоклиматов верхнего плейстоцена в осадках озера Байкал. *Геология и геофизика* 38(5): 957–980.

Евстафьев В.К., Бондаренко Н.А., Мельник Н.Г. 2010. Анализ многолетней динамики основных звеньев трофической цепи в пелагиали озера Байкал. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология* 3(1): 3-11.

Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А., Кузьмин М.И. и др. 2001. Оледенения и межледниковья Сибири — палеоклиматическая запись из озера Байкал и ее корреляция с западно-сибирской стратиграфией (эпоха прямой полярности Брюнес). *Геология и геофизика* 52(1-2): 48-63.

Карабанов Е.Б. 1999. Геологическое строение осадочной толщи озера Байкал и реконструкции изменений климата центральной Азии в позднем кайнозое. Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва, Россия.

Кузьмин М.И., Карабанов Е.Б., Каваи Т. и др. 2001. Глубоководное бурение на Байкале – основные результаты. *Геология и геофизика* 42(1-2): 8-34.

Кузьмин М.И., Хурсевич Г.К., Прокопенко А.А. и др. 2009. Центрические диатомовые водоросли позднего кайнозоя озера Байкал: морфология, систематика, стратиграфическое распространение, этапность развития (по материалам глубоководного бурения). Новосибирск: Академическое издательство «ГЕО».

Поповская Г.И., Генкал С.И., Лихошвай Е.В. 2002. Диатомовые водоросли планктона озера Байкал. Новосибирск: Наука.

Хурсевич Г.К., Карабанов Е.Б., Прокопенко А.А. и др. 2001. Детальная диатомовая биостратиграфия осадков озера Байкал в эпоху Брюнес и климатические факторы видообразования. *Геология и геофизика* 42(1-2): 108-129.

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

Bradbury J.P., Bezrukova Ye.V., Chernyaeva G.P. et al. 1994. A synthesis of post-glacial diatom records from Lake Baikal. *Journal of Paleolimnology* 10: 213-252.

Jewson D.H., Granin N.G. 2014. Cyclical size change and population dynamics of a planktonic diatom, *Aulacoseira baicalensis*, in Lake Baikal. *European Journal of Phycology* 50(1): 1-19. DOI: [10.1080/09670262.2014.979450](https://doi.org/10.1080/09670262.2014.979450)

Mackay A.W., Flower R.J., Kuzmina A.E. et al. 1998. Diatom succession trends in recent sediments from Lake Baikal and their relationship to atmospheric pollution and to climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 353: 1011-1055.

Mackay A.W., Battarbee R.W., Flower R.J. et al. 2000. The deposition and accumulation of endemic planktonic diatoms in the sediments of Lake Baikal and an evaluation of their potential role in climate reconstruction during the Holocene. *Terra Nostra* 9: 34-48.

Ohlendorf C., Sturm M. 2008. A modified method for biogenic silica determination. *Journal of Paleolimnology*, 54: 137-142.

Roberts S., Swann G.E.A., McGowan S. et al. 2018. Diatom evidence of 20th century ecosystem change in Lake Baikal, Siberia. *PLOS ONE* 13(12): e0213413. DOI: [10.1371/journal.pone.0208765](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208765)

Ryves D.B., Jewson D.H., Sturm M. et al. 2003. Quantitative and qualitative relationships between planktonic diatom communities and diatom assemblages in sedimenting material and surface sediments in Lake Baikal, Siberia. *Limnology and Oceanography* 48(4): 1643-1661.

Sturm M., Vologina E.G., Budnev N.M. et al. 2015. Results of 20 years of sediment trap monitoring. Particle dynamics in ocean-like Lake Baikal. In: 9th Symposium for European Freshwater Sciences «Freshwater sciences coming home», pp. 165.

Vologina E.G., Sturm M., Vorob'eva S.S. et al. 2020. Late Holocene sediments in the profound abyss of Southern Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 585–587. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-585](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-585)

Vologina E.G., Sturm M., Budnev N.M. 2022. Results of long-term measurements of particulate matter in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 193–196. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-4-193](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-193)