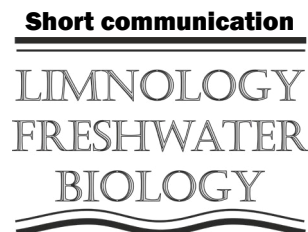


Silica in sapropel sediments of small lakes across different landscape zones in the south of Western Siberia



Strakhovenko V.D.*, Ovdina E.A., Malov G.I., Malov V.I., Danilenko I.V.

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 3 Akad. Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. Using IR-spectroscopy, the ratio of biogenic to silicate (terrigenous) silica was determined in small lakes of the Baraba Lowland, located in different landscape zones of the south of Western Siberia. These lakes exhibit substantially differing hydrochemical water parameters and sapropel composition. It was established that in sapropel deposits across all landscape zones, regardless of sapropel type, class, or genetic kind, the content of biogenic SiO_2 (SiO_2bio) ranges from 12% to 29% of the total silica content (siliceous sapropel: 12–29%; calcareous sapropel: 13–25%; mixed sapropel: 12–29%).

Keywords: biogenic silica, silicate (terrigenous) silica, sapropel sediments, small lakes, Western Siberia

For citation: Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I., Malov V.I., Danilenko I.V. Silica in sapropel sediments of small lakes across different landscape zones in the south of Western Siberia // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 622-634. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-622

1. Introduction

Analysis of the chemical composition of sapropels and the mechanisms governing their property manifestations, depending on interactions between organic and mineral sediment components — including specific behavior patterns of SiO_2 — holds significant scientific and practical interest. These investigations are essential both for addressing paleolimnological questions and developing rational environmental management approaches.

Silicon, being the second most abundant element in the Earth's crust, exhibits limited mobility in aquatic environments due to the low solubility of silicate minerals. In the hydrosphere, it occurs predominantly in two forms: dissolved (various species of silicic acids) and suspended (colloidal-sized solid particles comprising silicate minerals and silica). Despite relatively low concentrations in water, silicon plays a fundamental role in aquatic ecosystem functioning as an essential nutrient for numerous aquatic organisms.

The structure of aquatic communities and species diversity can vary significantly even among closely located lakes, owing to differential contributions of organism groups to organic matter formation (Zarubina, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Sharov, 2017). The highest productivity occurs in water bodies of humid zones (taiga landscapes), where organic accumulation processes dominate over decomposition

(Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016). Bacteria, phytoplankton, zooplankton, and phytobenthos constitute primary contributors to sedimentary organic matter (Zarubina, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Sharov, 2017; Smelyi et al., 2020). In Siberian lake sediments, diatoms represent a significant phytoplankton component, with their frustules containing biogenic silica. Submerged hydrophytes and emergent vegetation serve as secondary sources of biogenic silica in bottom sediments (Schoelynck et al., 2010; Zarubina, 2013; Helmond et al., 2015; Yermolaeva et al., 2016).

Contemporary research utilizes the distribution of diatom algae and biogenic silica concentrations in lake sediments to reconstruct environmental changes and date climatic stages (e.g., in Lakes Baikal, Onego, and Ladoga) (Kuz'min et al., 2014; Nazarova et al., 2020). The applied significance of studying biogenic silica accumulation in organic-mineral sediments (sapropels) lies in its role as a source of silicon compounds when used as fertilizer. These compounds enhance soil structure, increase fertility, and promote environmentally sustainable agricultural production (Perry and Keeling-Rucker, 2000; Goleva, 2004; Mitani and Ma, 2005). Additionally, sapropel resources exhibit high therapeutic efficacy as medicinal muds due to their unique microbial composition and colloidal texture, making them promising for medical applications (Avvakumova, 2002; Kholopov et al., 2003).

*Corresponding author.

E-mail address: strahova@igm.nsc.ru (V.D. Strakhovenko)

Received: June 24, 2025; **Accepted:** August 06, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



The aim of the work is to identify the role of interaction between organic and mineral phases SiO_2 in the formation of the properties of sapropels, which determine their value as paleoarchives for paleolimnological reconstruction and the development of technologies for rational nature management (fertilizers, therapeutic muds).

2. Objects, Materials and Methods

The object of the study is the bottom sediments of small lakes in the south of Western Siberia.

The studied small lakes of the Baraba Lowland (southern Western Siberia) span southern taiga, sub-taiga, forest-steppe, and steppe landscapes. They exhibit substantial variability in hydrochemical parameters and sapropel composition depending on origin, even within single landscape units (Strakhovenko et al., 2019; 2023; Taran et al., 2018). Based on biological contribution to sapropel formation, organic/mineral content, and geochemical composition, 19 lakes were selected as model objects from 96 candidate lakes across landscape zones for detailed analysis of organic-mineral interactions in sediments. These lakes underwent quantitative assessment of biogenic silica in the core of sapropel deposits from depths of 0-5 cm, 10-15 cm, 20-25 cm using IR-spectroscopy (Table 1).

The selected lakes represent diverse biogenetic formation types and classes of organic-mineral bottom sediments. The classification by type is based on ash

content (%): organogenic ($\leq 30\%$), organic-mineral (31-50%), and mineral-organogenic (51-70%). By Si/Ca ratio, they are divided into three classes: siliceous ($\text{Si} > \text{Ca}$), calcareous ($\text{Ca} > \text{Si}$), and mixed ($\text{Si} \sim \text{Ca}$). Based on the dominant biomass group, sediments are categorized as planktonic, macrophytic, and planktonic-macrophytic (Table 1) (Strakhovenko et al., 2019).

According to data from our hydrobiologist colleagues N.I. Yermolaeva and E.Yu. Zarubina (Institute for Water and Environmental Problems SB RAS), who participated in joint expeditions to the studied lakes, diatoms constitute a significant portion of phytoplankton in Siberian lake sediments, with their frustules containing biogenic silica. The secondary sources of biogenic silica in bottom deposits are submerged hydrophytes and emergent vegetation, with the most productive communities being: for macrophytic vegetation - Lakes Kachkulnya and Bol. Kurgan; for phytoplankton - Lakes Barchin, Kajly, Bugristoe, and Minzelinskoe; for zooplankton - Lakes Bol. Kurgan, Suetok, Bugristoe, Kajly, and Kambala. The highest percentage of biotic contribution to sapropel formation was observed in Lakes Suetok, Bol. Kurgan, Kambala, Yargol, Bol. Kajly, Yakovo, Sarbalyk, and Peschanoe. The flux of autochthonous organic matter ranges from 3% to 42% of the total sedimentation flux, with the remaining balance components consisting of redeposited detritus from previous years, along with mineral and organic matter inputs from the catchment area (Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016).

Table 1. Lake geographic coordinates, sapropel sediment classification (type/class/genetic kind), and biogenic/total SiO_2 content (%).

Lake	Location		Ash content (%)	Type and genetic kind of sapropel	Sapropel class	Si mg/L	SiO_2 bio	SiO_2 total	SiO_2 bio/ SiO_2 total (%)	% of the biotic component in sedimentation flow*
	Lat. N	Lon. E								
Kachkulnya	55.24736	80.58445	17	O, (M)	$\text{Si} > \text{Ca}$	12	3	12	25	n.d.
Yakovo	56.75718	84.77	16	O, (P)	$\text{Si} > \text{Ca}$	9	5	26	19	52
Yargol	55.60186	78.36239	35	OM, (M)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	11.9	5	17	29	29.7
Minzelinskoe	55.34390	83.16070	45	OM, (M)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	10	4	16	25	3.0
Bol. Kurgan	55.57335	78.68706	44	OM, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	5	5	29	17	21.2
Barchin	55.71126	78.14488	40	OM, (PM)	$\text{Ca} > \text{Si}$	12.3	3	11	27	12.7
Peschanoe	55.41133	78.34677	40	OM, (PM)	$\text{Ca} > \text{Si}$	4.9	2	15	13	45.7
Bol. Kajly	55.41619	78.30154	48	OM, (PM)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	5.7	5	24	21	70.5
Tsybovo	55.30673	77.58808	48	OM, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	9	5	30	17	36.8
Sarbalyk	55.55642	78.71511	49	OM, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	2.1	4	32	13	62.6
Kajly	55.6234	78.27348	55	MO, (PM)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	0.5	3	25	12	21.0
Shchuchye-K	56.53948	76.459901	51	MO, (PM)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	3.6	2	11	18	n.d.
Kambala	55.67543	78.20223	56	MO, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	4.2	6	34	18	30.8
Bergul	55.60488	78.26114	65	MO, (PM)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	0.2	5	30	17	35
Krugloe	56.75	84.7057	59	MO, (P)	$\text{Si} > \text{Ca}$	4	6	40	15	28
Suetok	55.53868	78.56039	59	MO, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	5	6	46	13	42.0
Mostovoe	55.45831	78.204767	61	MO, (PM)	$\text{Si} \sim \text{Ca}$	10.1	6	22	27	39.0
Bilgen	55.55698	78.62695	68	MO, (PM)	$\text{Si} > \text{Ca}$	0.5	5	40	13	21.2
Shchuchye-L	56.40868	76.6533	59	MO, (PM)	$\text{Ca} > \text{Si}$	4.2	2	8	25	n.d.

Note. Types: O – organogenic, OM – organic-mineral, MO – mineral-organogenic; Classes: $\text{Si} > \text{Ca}$ – siliceous, $\text{Ca} > \text{Si}$ – calcareous, $\text{Si} \sim \text{Ca}$ – mixed; Genetic kinds (according to data from N.I. Ermolaeva and E.Yu. Zarubina): (P) – planktonic; (M) – macrophytic; (PM) – planktonic-macrophytic; n.d. – no data.

Analytical studies were carried out in the Analytical Centre for Multi-Elemental and Isotope Research of the SB RAS (IGM SB RAS, Novosibirsk). Si in water were determined via atomic absorption using a Solaar M6 instrument equipped with a Zeeman and deuterium background corrector (Thermo Electron, USA). A detailed study of the structural features, the morphology at the level of individual mineral grains of the bottom sediment was carried out using scanning electron microscope (Mira 3 Tescan, Tescan, Czech Republic). The specific modification of the equipment used an Si(Li) energetic detector, enabling quantitative chemical analysis to be carried out on micro volumes. To determine the chemical composition of bottom sediments (Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3), X-ray fluorescence spectrometry was performed using an ARL-9900-XP spectrometer (Applied Research Laboratories, USA). X-ray diffraction (XRD) analysis was conducted on an ARL X'TRA diffractometer with Cu K α radiation.

To ensure the required particle size for shooting IR spectra, the analyzed samples and pure substances for standard mixtures were thoroughly ground manually in an agate mortar for 20 min. The time was selected based on our own experiments and literature data. Grinding was carried out in ethyl alcohol to avoid profound changes in the structural state of the minerals. Then, weighed portions (3 mg) of the analyzed sediments and standards were thoroughly mixed (without grinding!) with potassium bromide (800 mg) for 7 min. This time is sufficient to achieve maximum homogenization of the mixture, which is confirmed by the constancy of the spectrophotometer readings when rotating the tablet with the sample by 90° in the radiation beam. The tablets were prepared by pressing the homogeneous mixture in a vacuum press form and stored in a desiccator over P_2O_5 . The spectra were recorded on a Specord 75 IR dual-beam spectrophotometer in the range of 400-4000 cm^{-1} , with a pure KBr tablet in the reference channel. The recording was carried out in transmission. To obtain a digital image, the spectra were recorded on a VERTEX spectrometer 70 FTIR from Bruker. To improve the accuracy of the analysis, the spectrum in the region of analytical bands (600-900 cm^{-1}) was recorded with stretching along the abscissa axis. For quantitative assessment of biogenic silica, we exploited the distinct shape of its 800 cm^{-1} absorption band compared to the interfering quartz band. The latter exhibits a narrow profile with a sharply declining high-frequency wing beyond 820 cm^{-1} . In contrast, the biogenic silica band is broad, dome-shaped, and its high-frequency wing decreases only toward 860 cm^{-1} , remaining unobscured in the 820-860 cm^{-1} region. Spectra were digitized using a VERTEX 70 FT-IR spectrometer (Bruker). The band shape in this spectral region (825-850 cm^{-1}) for pure biogenic silica allows effective linear approximation. This enables determination of the band maximum position in sediment spectra where it is not explicitly resolved, using reference spectra of pure biogenic silica (SiO_2bio). Through these calculations, the implicit SiO_2bio band maximum is identified in sample spectra, and its concentration is quantified via calibration curves.

3. Results and Discussion

The waters of the studied lakes are predominantly fresh, bicarbonate, with variations from calcium to sodium, alkaline, with pH values from 7.1 (oz. Yakovo) to 10 (Lake Peschanoe). The Eh index of water in all the studied lakes is positive from 287 mV (Lake Chistoe) to 375 mV (Lake Bergul). The content of oxygen dissolved in water is 5-12 mg/dm³, the concentration of organic substances is 4.54 – 8.32 mg/dm³. The lakes (Tsybovo, Chistoe) with values of total mineralization from 1 to 3 g/l, they are brackish and one lake is salty (Lake Peschanoe (3.3 g/l)) (Strakhovenko et al., 2019; 2023). The source of dissolved silicon entering the lake are silicate minerals (feldspars, micas) from the loams of the drainage basin (Table 1).

Mineralogical analysis of the studied lake sediments using SEM and XRD established that alongside detrital minerals (allothigenic component) with consistent composition across lakes (quartz, feldspars, muscovite, illite (XRD diffractograms are mica), chlorite), various authigenic minerals accumulate in order of prevalence: pyrite (all lakes), carbonates (in calcareous and mixed sapropel classes), barite (trace amounts in all lakes), and gypsum (minor content in Lake Tsybovo) (Strakhovenko et al., 2014; 2019; 2023). In calcareous and mixed-class sapropel deposits of the studied lakes, authigenic carbonates are represented by low-Mg calcite or calcite. Among low-Mg calcite precipitates, either ultrafine crystals ($\leq 2 \mu\text{m}$) or phytomorphs—pseudomorphs after plant residues, animal remains, or fecal pellets—predominate. Calcite aggregates typically form large crystals (100 μm) with rhombohedral and scalenohedral habits (sometimes zoned), creating clusters of 100-1000 μm . Aragonite overwhelmingly dominates shell material frequently present in varying amounts within lake sediments. Pyrite precipitates (up to 5% of total mineral composition) were identified in the uppermost sediment layers of all lakes as framboids ($\leq 0.01 \text{ mm}$) and their aggregates, along with individual crystals of diverse habits (2-10 μm).

XRD patterns of sapropels from all lakes exhibit a prominent amorphous halo with maximum intensity at approximately 2θ Cu K α . The intensity of this amorphous halo correlates with organic carbon content and/or diatom frustule concentration (amorphous silica), as shown in Figure 1.

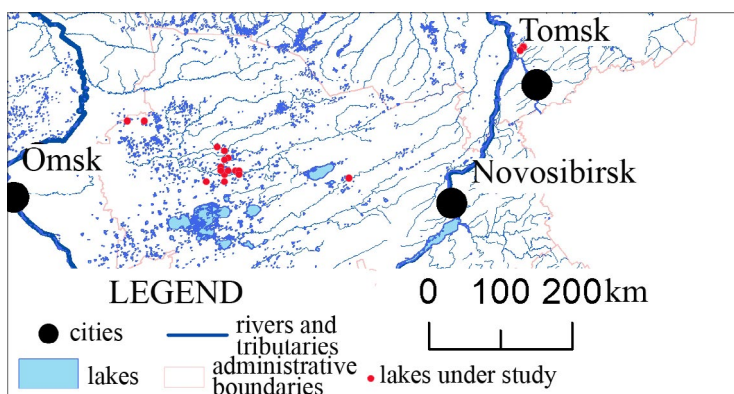


Fig.1. A map of the actual material.

According to hydrobiological data, sapropel composition across all studied lakes from different landscape zones of southern Western Siberia is determined by species diversity and biota productivity. Sources of autochthonous organic matter include primary producers: either phytoplankton (planktonic species), or macrophytes (macrophytic species), or both together (planktonic-macrophytic species) (Table 1) (Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016). In all lakes, particularly those with siliceous and mixed sapropel classes, diatoms constitute a significant portion of phytoplankton, their frustules containing biogenic silica (Fig. 2). Taiga zone lakes (e.g., Yakovo, Krugloe, Shchuchye-K, Shchuchye-L) show limited macrophyte development. Forest-steppe "macrophyte lakes" exhibit dense vegetation coverage (30-90% of surface area) with floating-mat, floating-swamp, or marginal reed types, dominated by emergent vegetation with subordinate submerged forms (Zarubina, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016). These hydrophytes, particularly emergent vegetation, serve as secondary biogenic silica sources to sediments (Zarubina, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Strakhovenko et al., 2019) through the formation of biogenic silica phytomorphs after plant detritus—the most common macrophyte fossilization pathway (Fig. 2).

In his publications, academician G.A. Zavarzin demonstrated that the transformation of organic matter occurs most actively in the aqueous and colloidal fractions of sapropel deposits. Here, fermentation and degradation processes take place depending on the substances' resistance to oxidation (Zavarzin, 2004; Romankevich et al., 2009). Ultimately, these processes determine the distinct composition of each lake's sapropel deposit. When processing sapropel into products, knowledge of its fundamental characteristics is essential, necessitating detailed investigation for each specific lake. To identify factors influencing biogenic silica accumulation and distribution in the studied sapropel sediments, quantitative assessment was performed.

Quantitative data on biogenic silica content in the studied sapropel deposits of small lakes are presented in Table 1 and illustrated for Lake Mostovoe in (Figure 3a) and Figure 3b shows a graph comparing the concentration of Si in water and the content of biogenic silica from the total mass of its gross composition in the bottom sediment (%).

According to analytical data, the concentration of Si in water varies widely from 0.2 to 12.3 mg/l, and biogenic silica content in the sapropel deposits of the studied lakes ranges from 2% to 6% of the total non-hydrolyzable sediment fraction. Across sapropel types, total SiO_2 content naturally increases with higher ash content from organogenic to mineral-organogenic types, varying as follows: organogenic – 7-26% of mineral sediment fraction; organic-mineral – 11-32%; mineral-organogenic – 8-46%. Meanwhile, biogenic silica consistently constitutes 2-6% of the non-hydrolyzable fraction regardless of sapropel type. As expected, maximum total SiO_2 content (46% of mineral fraction) occurs in siliceous-class sapropel (Lake Suetok), where biogenic silica reaches 6%. Minimum values (8% total SiO_2) characterize calcareous-class deposits (Lake Shchuchye-L), with biogenic silica at 2%. For different genetic kinds, biogenic silica concentrations vary within identical ranges (Table 1). An increase in the amount of silicon concentration in water correlates with an increase in the proportion of biogenic silica ($\text{SiO}_{2\text{ bio}}$) of the total silica content in the bottom sediment (Fig. 3b). At the same time, our research revealed a key pattern: in sapropel deposits of southern Western Siberian lakes, the proportion of biogenic silica ($\text{SiO}_{2\text{ bio}}$) demonstrates remarkable stability, constituting 12-29% of total silica content. This feature persists regardless of the lake's landscape zone, sapropel type, class, or genetic kind, despite significant fluctuations in total silica within the mineral sediment fraction. The presence of diatom frustules and macrophyte remnants in modern sediments indicates the preservation of their unique properties as natural sorbents,

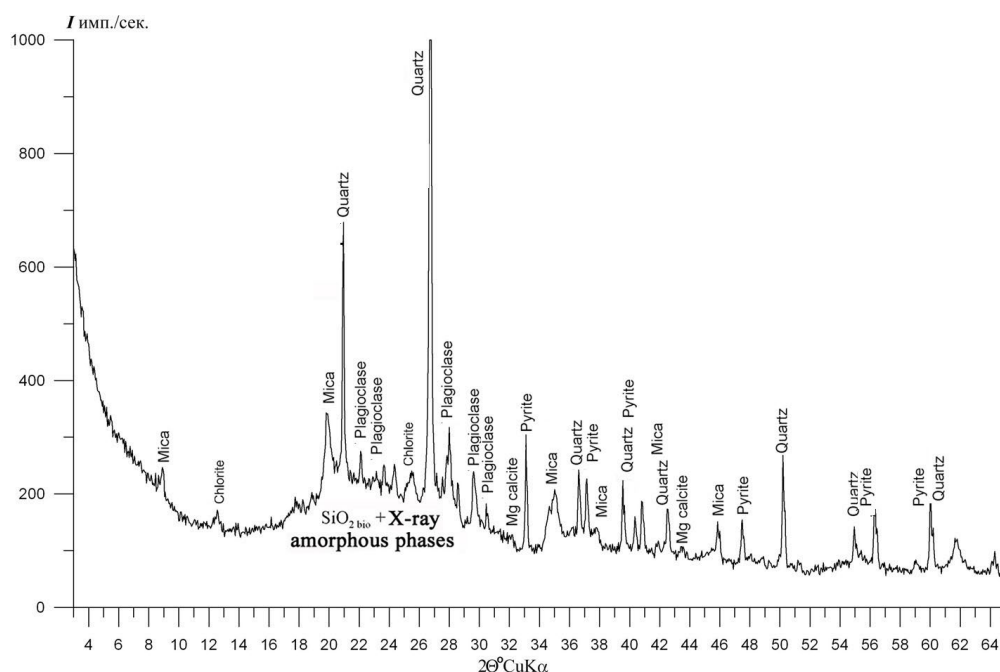


Fig.2. X-ray diffractogram of bottom sediments in Lake Kambala.

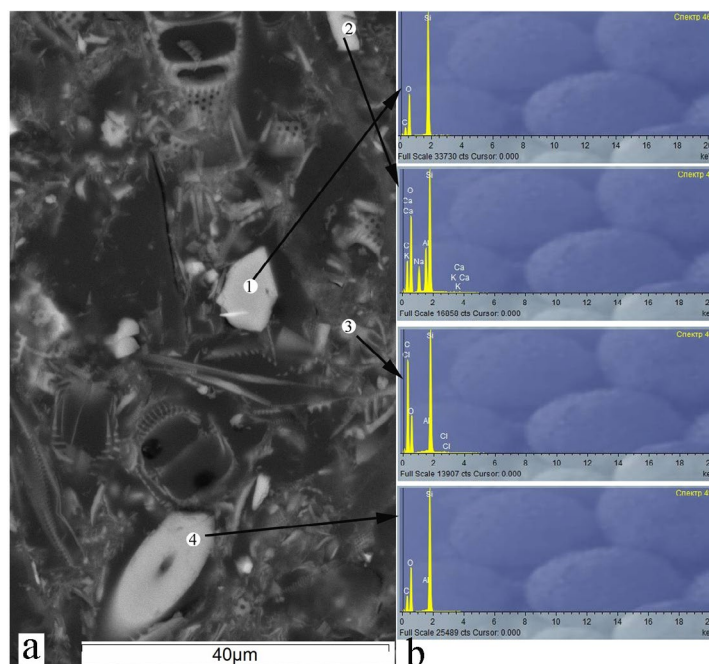


Fig.3. (a) BSE-SEM image (SEM Mira 3 Tescan) and (b) SEM quantitative chemical analysis spectrum of bottom sediments from Lake Bol. Kurgan (organic-mineral; siliceous; planktonic-macrophytic sapropel). Mineral grains of terrigenous fraction: 1 – angular quartz grain; 2 – elongated andesine grain; 3 – diatom frustules ($mSiO_2 \cdot nH_2O$); 4 – phytomorphic biogenic silica after macrophytes ($mSiO_2 \cdot nH_2O$).

along with abundant colloids and fine particles within the studied sapropel deposits. Possessing high moisture capacity and adsorption capacity, such bottom sediments are the basis for the production of sorbents, which are in demand in various fields, including water treatment, agriculture and the production of building materials (Skubiszewska-Zięba et al., 2012; Anil et al., 2014). For example, sapropel lake Peschanoe is actively mined and used for the production of organic drainage complex, bioadditives in the cattle farming.

4. Conclusions

It has been established that in sapropel deposits across all landscape zones, regardless of sapropel type, class, or genetic kind, SiO_2 bio content constitutes 12-29% of total silica (siliceous: 12–29%; calcareous: 13–25%; mixed: 12–29%). This consistency stems from significant contributions of either diatom frustules and/or SiO_2 pseudomorphs after macrophyte mortmass, which supplement detrital quartz, feldspars, and micas in all lakes.

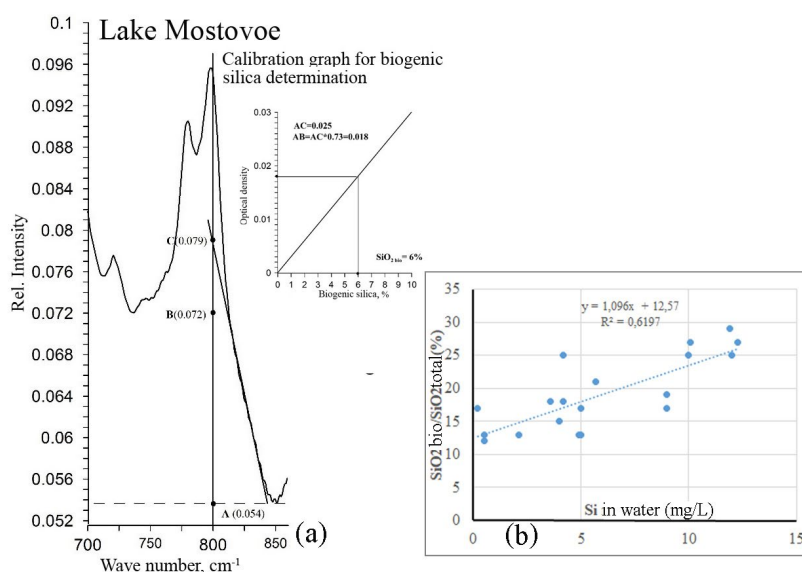


Fig.4. (a) IR-spectrum of sapropel from Lake Mostovoe showing the diagnostic band at $\sim 800\text{ cm}^{-1}$ and calibration curve for quantitative determination of pure biogenic silica; (b) - graph of the ratio of Si concentrations in water and the content of biogenic silica from the total mass of its gross composition in the bottom sediment.

Such stability in SiO₂ bio proportions indicates fundamental biogeochemical consistency throughout the region, reflecting a self-regulating equilibrium in biogenic silica accumulation mechanisms and functional autonomy of the biological silicon cycle from mineral sources.

Acknowledgments

Work is done on state assignment of IGM SB RAS (№ 122041400193-7) with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Anil U.E., Al E., Kayaci K. et al. 2014. Fabricating of diatomite based ceramic water filter by a novel casting method. *Advances in Science and Technology* 91: 48–53. DOI: 10.4028/ URL: www.scientific.net/ast.91.48
- Avvakumova N.P. 2002. Biochemical aspects of the therapeutic effectiveness of humic acids of therapeutic mud. Samara: The Ministry of Healthcare grew Russian Federation, Samara State Medical University un-t. (in Russian)
- Goleva A.A. 2004. Biogeochemistry of amorphous silica in plants and soils. In: Glazovsky N.F. (Ed.), *Soils, biogeochemical cycles, and the biosphere*. Moscow, pp. 137–159. (in Russian)
- Helmond N.A.G.M., Hennekam R., Donders T.H. et al. 2015. Marine productivity leads organic matter preservation in sapropel S1: palynological evidence from a core east of the Nile River outflow. *Quaternary Science Reviews* 108: 130–138. DOI: [10.1016/j.quascirev.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.014)
- Kholopov A.P., Shashel V.A., Perov Yu.M. et al. 2003. Mud treatment. Krasnodar: Periodicals of Kuban. (in Russian)
- Kuz'min M.I., Bychinskii V.A., Kerber E.V. et al. 2014. Chemical composition of sediments in baikal deep-water boreholes as a basis for reconstructions of climatic and environmental changes. *Russian Geology and Geophysics* 55 (1): 1–17. DOI: [10.1016/j.rgg.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.12.001)
- Lectures on natural microbiology. 2004. In: Zavarzin G.A. (Ed.). Moscow: Nauka Publ. (in Russian)
- Mitani N., Ma J.F. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56 (414): 1255–1261.
- Nazarova L., Syrykh L.S., Mayfield R. et al. 2020. Palaeoecological and palaeoclimatic conditions on the Karelian Isthmus (northwestern Russia) during the Holocene. *Quaternary Research* 95: 65–83. DOI: [10.1017/qua.2019.88](https://doi.org/10.1017/qua.2019.88)
- Perry C.C., Keeling-Rucker T. 2000. Biosilicification: the role of the organic matrix in structure control. *Journal of Biological Inorganic Chemistry* 5: 537–550.
- Romankevich E.A., Vetrov A.A., Peresypkin V.I. 2009. Organic matter of the World ocean. *Russian Geology and Geophysics* 50(4): 299–307.
- Schoelynck J., Bal K., Backx H. et al. 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose. *New Phytologist* 186: 385–391.
- Sharov A.N. 2017. Assessment of the quality of waters of various types of cold-water lakes according to phytoplankton indicators. *Regionalnay ecology [Regional ecology]* 2 (48): 40–47. (in Russian)
- Skubiszewska-Zięba J., Charmas B., Lebeda R. et al. 2012. Carbon-mineral adsorbents with a diatomaceous earth/perlite matrix modified by carbon deposits. *Microporous and Mesoporous Materials* 156: 209–216. DOI: [10.1016/j.micromeso.2012.02.038](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.02.038)
- Smelyi R.V., Finkelshtein A.L., Yakimov I.S. et al. 2020. Estimation of the range of variation in the mineral composition of silicate lake bottom sediments using data from XRD and XRF. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 13(2): 260–272. DOI: [10.17516/1998-2836-0180](https://doi.org/10.17516/1998-2836-0180)
- Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I. et al. 2019. Genesis of organomineral deposits in lakes of the central part of the Baraba lowland (south of West Siberia) *Russian Geology and Geophysics* 60 (9): 978–989. DOI: [10.15372/GiG2019093](https://doi.org/10.15372/GiG2019093)
- Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov V.I. et al. 2023. Chemical Elements Concentration, Variations in Mineral Composition, and Current Rate of Sedimentation in Sapropel Deposits of Small Lakes in the Taiga Zone of Southern Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 64 (7): 824–838. DOI: [10.2113/RGG20234526](https://doi.org/10.2113/RGG20234526)
- Strakhovenko V.D., Taran O.P., Ermolaeva N.I. 2014. Geochemical characteristics of the sapropel sediments of small lakes in the Ob'-Irtys interfluvium. *Russian Geology and Geophysics* 55(10): 1160–1169.
- Taran O.P., Boltenev V.V., Ermolaeva N.I. et al. 2018. Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel. *Geochemistry International* 56 (3): 256–265. DOI: [10.7868/S001675251803007X](https://doi.org/10.7868/S001675251803007X)
- Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Puzanov A.V. et al. 2016. Hydrobiological conditions of sapropel formation in lakes in the south of Western Siberia. *Water Resources* 43(1): 129–140. DOI: [10.7868/S0321059616010077](https://doi.org/10.7868/S0321059616010077)
- Zarubina E.Y. 2013. Primary production of macrophytes from three diverse sapropel lakes in southern Western Siberia (within the Novosibirsk region) in 2012. *Mir nauki, culture i obrazovaniya [The World of Science, Culture and Education]* 5 (42): 441–444. (in Russian)
- Zarubina E.Y., Sokolova M.I. 2019. The role of zonal factors in the formation of productivity of small lakes in the south of the Ob-Irtys interfluvium. In: *Material II International Conference Lakes of Eurasia: problems and solutions*, pp. 80–84.

Кремнезём в сапропелевых отложениях малых озёр, расположенных в разных ландшафтных зонах юга Западной Сибири



Страховенко В.Д.*, Овдина Е.А., Малов Г.И., Малов В.И., Даниленко И.В.

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. С использованием ИК-спектроскопии в малых озерах, расположенных в Барабинской низменности на юге Западной Сибири в разных ландшафтных зонах, имеющих существенно отличающиеся гидрохимических параметры вод и вещественный состав сапропеля, определено соотношение биогенного и силикатного (терригенного) кремнезёма. Установлено, что для сапропелевых залежей во всех ландшафтных зонах, вне зависимости от типа, класса, генетического вида сапропеля содержания SiO_2 биогенного составляют от 12 до 29 % от валового кремнезёма (кремниевый 12 -29%; кальциевый 13-25%; смешанный 12- 29%).

Ключевые слова: биогенный и силикатный (терригенный) кремнезём, сапропелевые отложения, малые озера, Западная Сибирь

Для цитирования: Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И., Малов В.И., Даниленко И.В. Кремнезём в сапропелевых отложениях малых озёр, расположенных в разных ландшафтных зонах юга Западной Сибири // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 622-634. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-622](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-622)

1. Введение

Анализ химического состава сапропелей и механизмов проявления их свойств в зависимости от взаимодействия органической и минеральной составляющих осадка, включая особенности поведения SiO_2 , представляет значительный научный и практический интерес. Эти исследования важны как для решения вопросов палеолимнологии, так и для разработки подходов к рациональному природопользованию.

Кремний, занимая второе место по распространённости в земной коре, отличается ограниченной миграционной способностью в водной среде из-за низкой растворимости силикатных минералов. В гидросфере он присутствует преимущественно в двух формах: растворенная (разные виды кремниевых кислот) и взвешенная (твёрдые частицы коллоидной размерности, представленные силикатными минералами и кремнезёмом). Несмотря на относительно невысокую концентрацию в воде, кремний играет ключевую роль в функционировании водных экосистем, являясь важнейшим биогенным элементом для многих гидробионтов.

Структура водных сообществ и биологическое разнообразие могут существенно различаться даже

в близко расположенных озёрах, что обусловлено вкладом различных групп организмов в формирование органического вещества (Зарубина, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Шаров, 2017). Наибольшая продуктивность отмечается в водоёмах гумидных зон (таёжные ландшафты), где процессы накопления органики преобладают над её деструкцией (Зарубина, 2013; Yermolaeva et al., 2016). Основной вклад в формирования органического вещества донных отложений вносят бактерии, фитопланктон, зоопланктон, а также фитобентос (Зарубина, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Шаров, 2017; Smelyi et al., 2020). В донных отложениях озёр Сибири значительную долю в фитопланктоне составляют диатомовые водоросли, створки которых содержат кремнезём. Вторым поставщиком биогенного кремнезёма в донный осадок являются погруженные гидрофиты, воздушно-водная растительность (Schoelynck et al., 2010; Зарубина, 2013; Helmond et al., 2015; Yermolaeva et al., 2016).

В современных научных исследованиях изучение распределения диатомовых водорослей, концентраций биогенного кремнезёма в донных отложениях озёр используются для реконструкций вариаций изменения природной среды, для

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: strahova@igm.nsc.ru (V.D. Strakhovenko)

Поступила: 24 июня 2025; Принята: 06 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



оценки возрастных параметров климатических этапов и стадий (на примере озер Байкал, Онежского и Ладожского озер и др.) (Kuz'min et al., 2014; Nazarova et al., 2020). Прикладное значения изучения накопления биогенного кремнезёма в органоминеральных донных отложениях озер (сапропелях) состоит в том, что биогенный кремнезём в сапропелях служит источником кремниевых соединений при использовании их в качестве удобрений. Эти соединения улучшают почвенную структуру, повышают плодородие и способствуют получению экологически чистой сельскохозяйственной продукции (Perry and Keeling-Rucker, 2000; Гольева, 2004; Mitani and Ma, 2005). Другим параметром использования сапропелевого сырья является их высокая терапевтическая активность как лечебных грязей, связанная с наличием специфической микрофлоры и коллоидной текстуры, что делает их перспективными для применения в медицине (Аввакумова, 2002; Холопов и др., 2003).

Цель работы- выявить роль взаимодействия органической и минеральной фаз SiO_2 в формировании свойств сапропелей, обуславливающих их: ценность как палеоархивов для палеолимнологической реконструкции и разработки технологий рационального природопользования (удобрения, лечебные грязи).

2. Объекты, материалы и методы исследования

Объектом исследования являются донные отложения малых озер юга Западной Сибири. Изученные малые озера, расположенные в Барабинской низменности на юге Западной Сибири в ландшафтах южной тайги, подтайги, лесостепи и степи, имеют существенную вариабельность гидрохимических параметров вод и вещественного состава сапропелей в зависимости от их происхождения даже в пределах одного ландшафта (Strakhovenko et al., 2019; 2023, Taran et al., 2018 и др.).

На основе биологического вклада в формирование сапропелей, содержания органического и минерального вещества, их геохимического состава, из 96 озер, расположенных в пределах Барабинской низменности из разных ландшафтных зон, для детального исследования взаимоотношений органической и минеральной частей осадка, определены модельные объекты (19 озер) (Рис. 1 и Таблица 1). В этих озерах проведена количественная оценка биогенного кремнезёма в керне сапропелевых залежах с глубин 0-5 см, 10-15 см, 20-25 см с использованием ИК-спектроскопии (Таблица 1).

Выбранные озера принадлежат к различным типам биогенетического формирования и класса органоминеральных донных отложений: тип—органогенный с зольностью до 30 %; органоминеральный — 31—50 %; минерально-органогенный — 51—70 %; по соотношению Si/Ca подразделены на три класса: кремниевый ($\text{Si} > \text{Ca}$); кальциевый ($\text{Ca} > \text{Si}$), смешанный ($\text{Si} \sim \text{Ca}$); на основе домини-

рующей по биомассе группы организмов на планктонные, макрофитные и планктономакрофитные (Таблица 1) (Strakhovenko et al., 2019).

Согласно данным, полученным нашими коллегами гидробиологами Ермолаевой Н.И. и Зарубиной Е.Ю. (ИВЭП СО РАН), работающие с нами в единых экспедициях по изучаемым озерам, в донных отложениях озер Сибири значительную долю в фитопланктоне составляют диатомовые водоросли, створки которых содержат кремнезём. Вторым поставщиком биогенного кремнезёма в донный осадок являются погруженные гидрофиты, воздушно-водная растительность, представленная сообществами, наиболее продуктивными являются по высшей водной растительности озера Качкуль, Бол. Курган; по фитопланктону - Барчин, Кайлы, Бугристое, Минзелинское; по зоопланктону – Бол. Курган, Суеток, Бугристое, Кайлы, Камбала. Наибольший процент биотического вклада в процессы формирования сапропеля наблюдается в озерах Суеток, Бол. Курган, Камбала, Ярголь, Бол. Кайлы, Яково, Сарбалык, Песчаное. Поток автохтонного органического вещества составляет от 3 до 42 % от общей массы седиментационного потока. Остальные составляющие баланса - перезахоронение детрита прошлых лет, минеральная и органическая составляющая, поступающая с водосбора (Зарубина, 2013; Yermolaeva et al., 2016).

Аналитические исследования проведены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, Новосибирск). Определение Si в воде проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе Solaar M6, оснащённом снабженный зеемановским и дейтериевым корректором фона (Thermo Electron, США).

Детальное исследование структурных особенностей и морфологии на уровне отдельных минеральных зёрен донных отложений выполняли с помощью сканирующего электронного микроскопа Mira 3 Tescan (Tescan, Чехия). Специфическая модификация оборудования включала энергодисперсионный детектор $\text{Si}(\text{Li})$, позволяющий проводить количественный химический анализ в микрообъеме. Для определения химического состава донных отложений (N_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , P_2O_5 , K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3) использовался рентгено-спектральный флуоресцентный анализ на приборе «ARL-9900-XP» (Applied Research Laboratories, США).

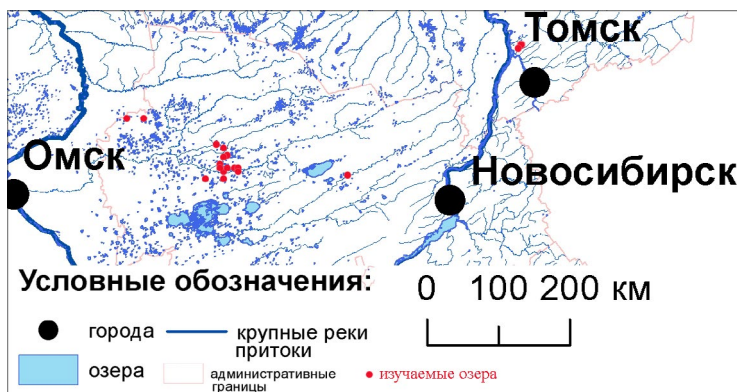


Рис.1. Карта фактического материала.

Таблица 1. Географические координаты озер, классификация сапропелевых отложений в озере по типу, классу, генетическому виду и содержание (%) биогенного и валового SiO₂.

озеро	координаты		Зольность	Тип и генетический вид сапропеля	Класс сапропеля	Si мг/л	SiO ₂ био	SiO ₂ валовое	SiO ₂ био / SiO ₂ валовое (%)	% биотической составляющей седиментационного потока*
	Сев. широта	Вост. долгота								
Качкульня	55,24736	80,58445	17	O, (M)	Si > Ca	12	3	7	25	н.д.
Яково	56,75718	84,77	16	O, (П)	Si > Ca	9	5	26	19	52
Ярголь	55,60186	78,36239	35	OM, (M)	Si ~ Ca	11,9	5	17	29	29,7
Минзелинское	55,34390	83,16070	45	OM, (M)	Si ~ Ca	10	4	16	25	53,0
Бол. Курган	55,57335	78,68706	44	OM, (ПМ)	Si > Ca	5	5	29	17	21,2
Барчин	55,71126	78,14488	40	OM, (ПМ)	Ca > Si	12,3	3	11	27	12,7
Песчаное	55,41133	78,34677	40	OM, (ПМ)	Ca > Si	4,9	2	15	13	45,7
Б,Кайлы	55,41619	78,30154	48	OM, (ПМ)	Si ~ Ca	5,7	5	24	21	70,5
Цыбово	55,30673	77,58808	48	OM, (ПМ)	Si > Ca	9	5	30	17	36,8
Сарбалык	55,55642	78,71511	49	OM, (ПМ)	Si > Ca	2,1	4	32	13	62,6
Кайлы	55,6234	78,27348	55	MO, (ПМ)	Si ~ Ca	0,5	3	25	12	21,0
Щучье К	56,53948	76,459901	51	MO, (ПМ)	Si ~ Ca	3,6	2	11	18	н.д.
Камбала	55,67543	78,20223	56	MO, (ПМ)	Si > Ca	4,2	6	34	18	30,8
Бергуль	55,60488	78,26114	65	MO, (ПМ)	Si ~ Ca	0,2	5	30	17	35
Круглое	56,75	84,7057	59	MO, (П)	Si > Ca	4	6	40	15	28
Суеток	55,53868	78,56039	59	MO, (ПМ)	Si > Ca	5	6	46	13	42,0
Мостовое	55,458317	78,204767	61	MO, (ПМ)	Si ~ Ca	10,1	6	22	27	39,0
Бильгень	55,55698	78,62695	68	MO, (ПМ)	Si > Ca	0,5	5	40	13	21,2
Щучье Л	56,40868	76,6533	59	MO, (ПМ)	Ca > Si	4,2	2	8	25	н.д.

Примечание: O - органогенный; OM - органоминеральный; MO - минерально-органогенный; Si > Ca - кремниевый; Ca > Si - кальциевый, Si ~ Ca - смешанный; (П) - планктонные, (M) - макрофитные и (ПМ) – планктономакрофитные; н.д. – нет данных; * - по данным Ермолаевой Н.И. и Зарубиной Е.Ю.

Рентгеновские исследования (XRD) проводились на дифрактометре ARL X'TRA (излучение Cu Kα).

Для обеспечения необходимого размера частиц для съемки ИК спектров анализируемые пробы и чистые вещества для стандартных смесей тщательно растирались вручную в агатовой ступке в течение 20 мин. Выбор времени сделан на основании собственных экспериментов и литературных данных. Измельчение проводилось в этиловом спирте, чтобы избежать глубокого изменения структурного состояния минералов. Далее навески (3 мг) анализируемых осадков и стандартов тщательно размешивались (без растирания!) с бромистым калием (800 мг) в течение 7 мин. Этого времени достаточно для достижения максимальной гомогенизации смеси, что подтверждается неизменностью показаний спектрофотометра при вращении таблетки с образцом на 90° в пучке излучения. Таблетки готовились методом прессования гомогенной смеси в вакуумной прессформе и хранились в эксикаторе над P₂O₅. Спектры записывались на двухлучевом спектрофотометре Specord 75 IR в области 400-4000 см⁻¹, с таблеткой чистого KBr в канале сравнения. Запись велась в пропускании.

Для получения цифрового рисунка спектры записывались на спектрометре VERTEX 70 FT IR фирмы Брукер. Для повышения точности анализа спектр в области аналитических полос (600-900 см⁻¹) записывался с растяжением по оси абсцисс. Для количественной оценки биогенного кремнезёма мы воспользовались значительным отличием формы его полосы поглощения 800 см⁻¹ от форм мешающей полосы кварца. Последняя является узкой, с резко спадающим уже к 820 см⁻¹ высокочастотным крылом. Полоса биогенного кремнезёма, напротив, довольно широкая, имеет куполообразную форму, и ее высокочастотное крыло спадает лишь к 860 см⁻¹, оставаясь свободным в интервале частот 820-860 см⁻¹. Форма полосы в области этого крыла в спектре чистого биогенного кремнезёма на участке 825-850 см⁻¹ допускает хорошую аппроксимацию прямой линией. Это позволяет, используя расчеты, снятые с спектра чистого SiO₂^{био}, определять положение максимума этой полосы в спектрах анализируемых осадков, где она в явном виде не проявляется. Расчеты позволяют в спектре изучаемого образца определять точку, соответствующую максимуму неявной полосы SiO₂^{био} и по калибровочному графику оценить его концентрацию.

3. Результаты и обсуждение

Воды исследованных озер преимущественно пресные гидрокарбонатные с вариациями от кальциевых до натриевых, щелочные, со значениями pH от 7.1 (оз. Яково) до 10 (оз. Песчаное). Показатель Eh воды во всех изученных озерах положительный от 287 мВ (оз. Чистое) до 375 мВ (оз. Бергуль). Содержания растворенного в воде кислорода 5-12 мг/дм³, концентрации органических веществ 4,54 – 8,32 мгО/дм³. Воды озер (Цыбово, Чистое, Жилое) со значениями общей минерализации от 1 до 3 г/л являются солоноватыми и одно озеро соленое (оз. Песчаное (3.3 г/л)) (Strakhovenko et al., 2019; 2023). Источником поступления в озеро растворенного кремния являются силикатные минералы (полевые шпаты, слюды) суглинков водосборного бассейна (Таблица 1).

Изучение минеральной части донных отложений исследуемых озер (с использованием СЭМ, XRD) позволило установить, что наряду с минералами обломочной фракции (аллотигенная составляющая), состав которых от озера к озеру постоянен (кварц, полевые шпаты, мусковит, иллит (XRD дифрактограммах - слюда), хлорит) накапливаются различные аутигенные минералы: (перечислены по степени встречаемости) пирит (во всех озерах), карбонаты (кальциевый и смешанный класс сапропеля), барит (следовые количества во всех озерах), гипс (невысокое содержание в оз. Цыбово) (Strakhovenko et al., 2014; 2019; 2023 и др.). В изученных озерах в сапропелевых залежах кальциевого и смешанного класса аутигенные карбонаты представлены низко-Mg кальцитом или кальцитом. Среди выделений низко-Mg кальцита преобладают либо мельчайшие (до 2 мкм) кристаллики, либо фитоморфозы - псевдоморфозы по остаткам растительности, животных или пеллетам. Агрегаты кальцита чаще всего представлены крупными кристаллами (100 мкм) ромбоэдрического и скаленоэдрического

габитуса (иногда зональные), образующие скопления до 100—1000 мкм. В составе раковин, которые часто присутствуют в донных отложениях озер в разных количествах, резко преобладает арагонит. Выделения пирита (иногда до 5% от общей массы минерального состава) установлены в самой верхней части донного осадка во всех изученных озерах: фрамбонды (размером не более 0,01 мм) и их скопления, а также отдельные кристаллы различного габитуса, размером от 2 до 10 мкм.

Дифрактограммы для сапропелей всех озер имеют ярко выраженное большое гало с максимумом в области 20 θ CuK α . Интенсивность аморфного гало коррелирует с содержанием органического углерода и/или концентрацией диатомовых створок (аморфного кремнезема) (Рис. 2). Согласно данным гидробиологов во всех изученных озерах из разных ландшафтных зон юга Западной Сибири выявлено, что состав сапропеля определяется видовым составом и степенью продуктивности биоты. Источниками автохтонного органического вещества в исследованных модельных озерах являются первичные продуценты: либо фитопланктон (планктонный вид), либо макрофиты (макрофитный вид) или и оба вместе (планктоно-макрофитный вид) (Таблица 1) (Зарубина, 2013; Yermolaeva et al., 2016). Во всех изученных озерах в сапропелевых отложениях, но особенно с кремниевым и смешанным классами сапропеля, значительную долю в фитопланктоне составляют диатомовые водоросли, створки которых содержат кремнезём (Рис. 2). Для таежной зоны характерно слабое развитие макрофитов (оз. Яково, Круглое, Щучье-К и Щучье-Л). Для «макрофитных» озер лесостепной зоны характерен массивно-зарослевый, займищный или сплавиный тип зарастания, площадь зарастания озер от 30 до 90%. И доминирует, в основном, полупогруженная растительность, при подчиненном количестве погруженной (Зарубина, 2013; 2019; Yermolaeva et

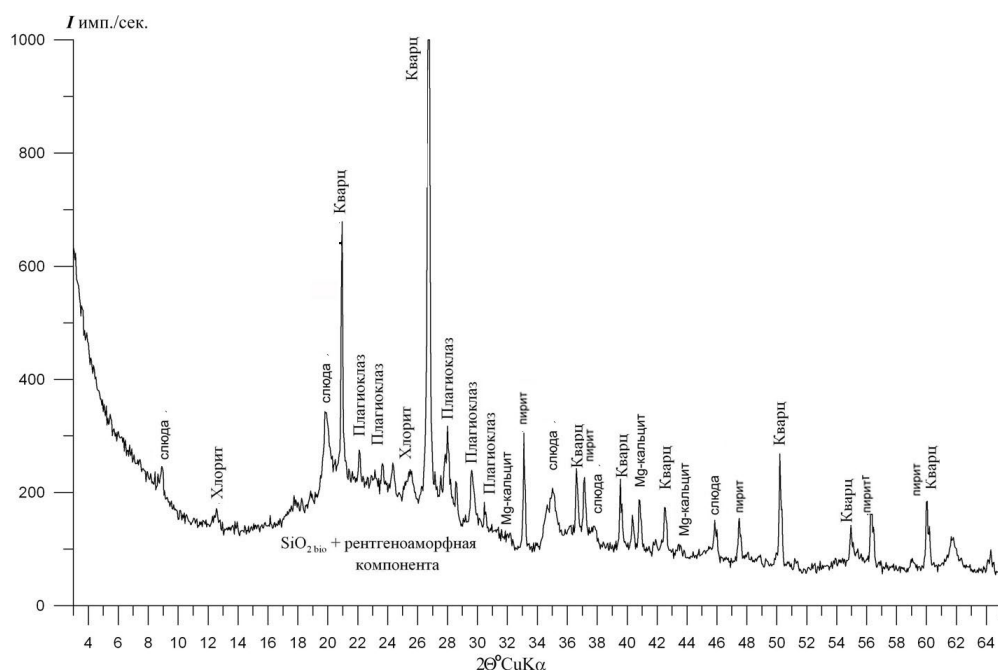


Рис.2. Дифрактограмма донных отложений озера Камбала.

al., 2016). Эти гидрофиты, воздушно-водная растительность и являются вторым поставщиком биогенного кремнезёма в донный осадок (Зарубина, 2013; 2019; Yermolaeva et al., 2016; Strakhovenko et al., 2019) за счет формирования агрегатов фитоморфоз по растительному детриту биогенным кремнезёмом (наиболее распространенный случай фоссилизации макрофитов) (Рис. 3).

В своих статьях академик Г.А. Заварзин показал, что преобразование органического вещества особенно активно происходит в жидкой и коллоидной части сапропелевых отложений. Здесь происходят процессы брожения и деградации различных веществ в зависимости от их устойчивости к окислению (Заварзин, 2004; Romankevich et al., 2009). В итоге, все эти процессы и определяют индивидуальный состав сапропелевой залежи озера. При получении продукции из сапропеля необходимо знать его основные характеристики, а это требует детальных исследований в каждом конкретном озере. Для выявления факторов, влияющих на накопление и распределение биогенного кремнезёма в сапропелевых отложениях изученных озер проведена его количественная оценка.

Полученные данные по количеству биогенного кремнезёма в изученных сапропелевых отложениях малых озер приведены в Таблице 1 и показаны на рисунке 3 на примере оз. Мостовое (Рис. 4а), а также приведен график сопоставления концентрации Si в воде и содержания биогенного кремнезёма от общей массы его валового состава в донном осадке на рисунке 4б.

Согласно полученным аналитическим данным концентрации Si в воде изменяется в широких пределах от 0,2 до 12,3 мг/л, а содержания биоген-

ного кремнезёма в сапропелевых залежах изученных озер варьирует от 2 до 6 % от общей массы негидролизующей части осадка. В сапропелях разного типа с увеличением зольности от органогенного до минерально-органогенного конечно же возрастает количество валового содержания SiO_2 , которые варьируют в пределах: органогенном – от 7 до 26 % от минеральной части осадка, органоминеральном от 11 до 32 %; минерально-органогенном от 8 до 46 %. При этом для всех типов сапропеля содержание биогенного кремнезёма в изученных озерах варьирует от 2 до 6 % от общей массы негидролизующей части донного осадка. В зависимости от класса сапропеля, как и следует ожидать, максимальные содержания валового SiO_2 выявлены для кремниевых 46 % от минеральной части осадка (оз. Суеток) при содержании биогенного кремнезёма 6 %, а минимальные для кальциевого 8 % (оз. Щучье-Л) при содержании биогенного кремнезёма 2 %. Для сапропелей разного генетического вида содержания биогенного кремнезёма варьируют в одних и тех же пределах (Таблица 1). Увеличение количества концентрации кремния в воде коррелирует с увеличением доли биогенного кремнезёма ($\text{SiO}_{2\text{био}}$) от общего содержания кремнезёма в донном осадке (Рис. 4 б). При этом проведённые исследования выявили важную закономерность: в сапропелевых отложениях озёр юга Западной Сибири доля биогенного кремнезёма ($\text{SiO}_{2\text{био}}$) демонстрирует удивительную стабильность, составляя 12-29% от общего содержания SiO_2 , независимо от ландшафтной зоны расположения озера, вне зависимости от типа, класса и генетической разновидности сапропелей, при значительных колебаниях общего содержания кремнезёма в минеральной части осадка.

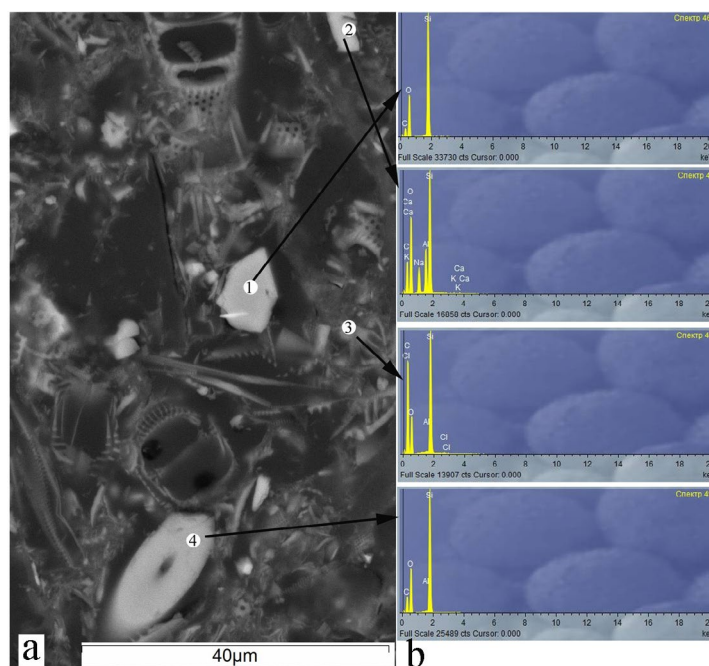


Рис.3. Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE (а) и спектр съёмки количественного химического анализа СЭМ (б) донного осадка оз. Бол. Курган (органоминеральный; кремниевый; планктономакрофитный сапропель). Зерна минералов терригенной фракции: 1 –неокатанное зерно кварца; 2 –удлиненное зерно андезина; 3 - створки диатомей ($\text{mSiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$); 4 - фитоморфоза биогенного кремнезёма по макрофиту ($\text{mSiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$).

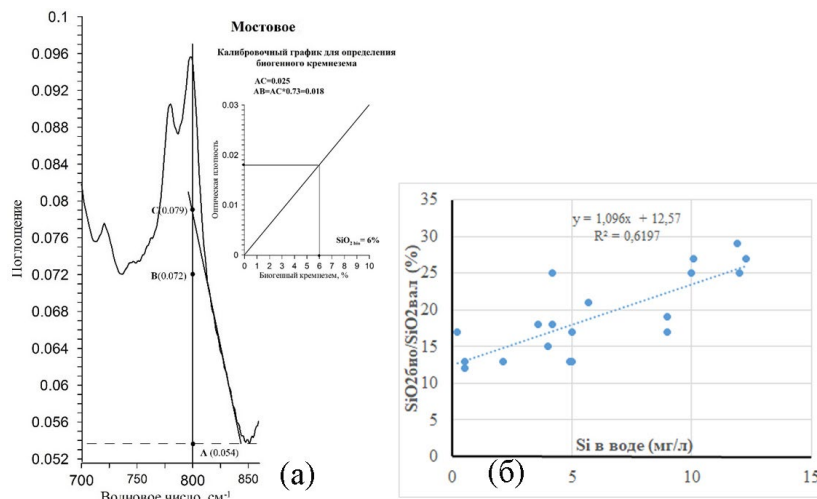


Рис.4. (а) ИК-спектр сапропеля оз. Мостовое с аналитической полосой (~800 см⁻¹) и калибровочный график для определения количества чистого биогенного кремнезема; (б) - график соотношения концентраций Si в воде и содержания биогенного кремнезёма от общей массы его валового состава в донном осадке.

Присутствие в современных илах панцирей диатомовых и остатков макрофитов указывает на сохранность уникальных их свойств – природных сорбентов, а также о наличии обилия коллоидов и мелкодисперсных частиц, в изученных сапропелевых залежах. Обладая высокой влагоёмкостью и адсорбционной способностью, такие донные осадки являются основой для изготовления сорбентов, которые востребованы в различных областях, включая водоочистку, сельское хозяйство и производство строительных материалов (Skubiszewska-Zięba et al., 2012; Anil et al., 2014). Например, сапропель оз. Песчаное активно добывается и используется для производства органического дренажного комплекса, биодобавок в животноводческом комплексе.

4. Заключение

Установлено, что для сапропелевых залежей во всех ландшафтных зонах, в независимости от типа, класса, генетического вида сапропеля содержания $\text{SiO}_{2\text{био}}$ составляют от 12 до 29 % от валового кремнезёма (кремниевый 12 -29%; кальциевый 13-25%; смешанный 12- 29%). Это определяется присутствием в значительных количествах диатомовых створок и/или псевдоморфоз SiO_2 по морт-массе макрофитов, которые во всех озерах добавляются к обломочному кварцу, полевым шпатам и слюдам.

Такая устойчивость процентного соотношения $\text{SiO}_{2\text{био}}$ свидетельствует об универсальности биогеохимических процессов в регионе, сбалансированности механизмов накопления биогенного кремнезёма и определённой автономности биологического круговорота кремния от минеральных источников.

Финансирование

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400193-7) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Аввакумова Н.П. 2002. Биохимические аспекты терапевтической эффективности гумусовых кислот лечебных грязей. Самара: М-во здравоохранения Рос. Федерации, Самарский Государственный Медицинский Университет.
- Гольева А.А. 2004. Биогеохимия аморфного кремнезема в растениях и почвах. Почвы, биогеохимические циклы и биосфера. Под ред. Глазовский Н.Ф. Москва: Товарищество научных изданий КМК.
- Зарубина Е.Ю. 2013. Первичная продукция макрофитов из трех разнообразных сапропелевых озёр на юге Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 году. Мир науки, культуры и образования 5 (42): 441–444.
- Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. 2019. Роль зональных факторов в формировании продуктивности малых озёр юга Обь-Иртышского междуречья. В: II Международной конференции Озера Евразии: проблемы и пути их решения, С. 80–84.
- Лекции по природоведческой микробиологии. 2004. В: Заварзин Г.А. (Ред.). Москва: Наука.
- Холопов А.П., Шашель В.А., Перов Ю.М. и др. 2003. Грязелечение. Краснодар: Периодика Кубани.
- Шаров А.Н. 2017. Оценка качества вод разнотипных холодноводных озёр по показателям фитопланктона. Региональная экология 2 (48): 40–47.
- Anil U.E., Al E., Kayaci K. et al. 2014. Fabricating of diatomite based ceramic water filter by a novel casting method. *Advances in Science and Technology* 91: 48–53. DOI: 10.4028/ URL: www.scientific.net/ast.91.48
- Helmond N.A.G.M., Hennekam R., Donders T.H. et al. 2015. Marine productivity leads organic matter preservation in sapropel S1: palynological evidence from a core east of the Nile River outflow. *Quaternary Science Reviews* 108: 130–138. DOI: [10.1016/j.quascirev.2014.11.014](https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.014)
- Kuz'min M.I., Bychinskii V.A., Kerber E.V. et al. 2014. Chemical composition of sediments in baikal deep-water boreholes as a basis for reconstructions of climatic and environmental changes. *Russian Geology and Geophysics* 55 (1): 1–17. DOI: [10.1016/j.rgg.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.12.001)

Mitani N., Ma J.F. 2005. Uptake system of silicon in different plant species. *Journal of Experimental Botany* 56 (414): 1255–1261.

Nazarova L., Syrykh L.S., Mayfield R. et al. 2020. Palaeoecological and palaeoclimatic conditions on the Karelian Isthmus (northwestern Russia) during the Holocene. *Quaternary Research* 95: 65–83. DOI: [10.1017/qua.2019.88](https://doi.org/10.1017/qua.2019.88)

Perry C.C., Keeling-Rucker T. 2000. Biosilicification: the role of the organic matrix in structure control. *Journal of Biological Inorganic Chemistry* 5: 537–550.

Romankevich E.A., Vetrov A.A., Peresypkin V.I. 2009. Organic matter of the World ocean. *Russian Geology and Geophysics* 50(4): 299–307.

Schoelynck J., Bal K., Backx H. et al. 2010. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose. *New Phytologist* 186: 385–391.

Skubiszewska-Zięba J., Charmas B., Lebeda R. et al. 2012. Carbon-mineral adsorbents with a diatomaceous earth/perlite matrix modified by carbon deposits. *Microporous and Mesoporous Materials* 156: 209–216. DOI: [10.1016/j.micromeso.2012.02.038](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.02.038)

Smelyi R.V., Finkelshtein A.L., Yakimov I.S. et al. 2020. Estimation of the range of variation in the mineral composition of silicate lake bottom sediments using data from XRD and XRF. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 13(2): 260–272. DOI: [10.17516/1998-2836-0180](https://doi.org/10.17516/1998-2836-0180)

Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov G.I. et al. 2019. Genesis of organomineral deposits in lakes of the central part of the Baraba lowland (south of West Siberia) *Russian Geology and Geophysics* 60 (9): 978–989. DOI: [10.15372/GiG2019093](https://doi.org/10.15372/GiG2019093)

Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Malov V.I. et al. 2023. Chemical Elements Concentration, Variations in Mineral Composition, and Current Rate of Sedimentation in Sapropel Deposits of Small Lakes in the Taiga Zone of Southern Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 64 (7): 824–838. DOI: [10.2113/RGG20234526](https://doi.org/10.2113/RGG20234526)

Strakhovenko V.D., Taran O.P., Ermolaeva N.I. 2014. Geochemical characteristics of the sapropel sediments of small lakes in the Ob'-Irtysh interfluvium. *Russian Geology and Geophysics* 55(10): 1160–1169.

Taran O.P., Boltenkov V.V., Ermolaeva N.I. et al. 2018. Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel. *Geochemistry International* 56 (3): 256–265. DOI: [10.7868/S001675251803007X](https://doi.org/10.7868/S001675251803007X)

Yermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Puzanov A.V. et al. 2016. Hydrobiological conditions of sapropel formation in lakes in the south of Western Siberia. *Water Resources* 43(1): 129–140. DOI: [10.7868/S0321059616010077](https://doi.org/10.7868/S0321059616010077)