

Systematization of Organic-Mineral Bottom Sediments in Small Lakes of the Southern Western Siberia: A Landscape Zonation Context



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

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Akademika Koptyuga Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

ABSTRACT. The systematization of organic-mineral bottom sediments of 38 small lakes in the south of Western Siberia has been carried out, taking into account landscape and sapropelation zones. The study covers the subtaiga, forest-steppe, steppe and subzones of ribbon forests, where 494 samples of bottom sediments were taken. The analytical work was performed at the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS (Novosibirsk) using a set of modern analytical methods: determination of ash content, elemental composition (AAS, ICP-AES, and X-ray fluorescence), mineralogy (X-ray Diffraction, SEM). To systematize bottom sediments, the classification of bottom sediments developed by the authors was applied based on ash content (types), Si/Ca ratio (classes) and the type of dominant primary production (genetic species). The relationship between the distribution of bottom sediment types and landscapes, as well as sapropelation zones, has been identified. Organic-mineral and mineral-organogenic types prevail in the subtaiga/forest-steppe (intensive zone of sapropelation). Mineralized sapropels and mineral silts dominate the steppe/ribbon forests landscape (a zone of weak sapropel formation). Organogenic bottom sediments are extremely rare in all landscapes and sapropelation zones. The distribution of sediment classes among all the lakes considered is uneven, with the predominance of lakes with a silicon sediment class. Planktonic-macrophytic and macrophytic-planktonic genetic species are predominant regardless of the landscape and sapropelation zone. Local features of the geochemical and mineral composition in nearby lakes have been established using the example of Lakes Peschanoe and Chistoe (forest-steppe landscape), which is due to differences in the genetic species of sapropel. The proposed systematization makes it possible to assess the resource potential of sapropels for agriculture and reclamation, and serves as a basis for monitoring anthropogenic and climatic impacts. The unique composition of the bottom sediments of each individual lake underscores the need for detailed geochemical analysis when planning environmental management.

Keywords: sapropel, classification, genesis, dominant primary production, small lakes, south of Western Siberia

For citation: Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Malov G.I., Malov V.I. Systematization of Organic-Mineral Bottom Sediments in Small Lakes of the Southern Western Siberia: A Landscape Zonation Context // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 600-610. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-600

1. Introduction

The southern part of Western Siberia is located within the Ob-Irtysh river basin and is a region with a diverse range of lake area percentage, varying from basin to basin. This variation depends on factors such as the degree of forest cover and swampiness, as described by Kurakova (2023). According to Izmailova and Korneenkova (2020), the average lake area percentage is approximately 2%.

Lake systems (limnosystems) in the south of Western Siberia are open heterogeneous systems that

are particularly sensitive to environmental changes due to their small size (up to 10 km²), shallow water (3-5 m), and draininess (Savchenko, 1997). Each limnosystem integrates material and energy components (water, bottom sediments, suspension, biota, soils, catchment rocks) and landscape factors (climate, relief) related by spatial and functional interactions and developing as an integral object (Savchenko, 2016 with additions by the author). These components serve as sources and accumulators of allochthonous and autochthonous substances, being in a state of continuous interaction

*Corresponding author.

E-mail address: ovdina@igm.nsc.ru (E.A. Ovdina)

Received: July 31, 2025; **Accepted:** August 15, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



through phase interfaces and physical and chemical fields. The formation of organic-mineral bottom sediments in the small lakes of the region is the result of the interaction of litho-, hydro-, atmo- and biospheres, which determines their unique geochemical and mineral composition.

Organic matter is an essential component in complex biogeochemical processes, including food chains and chemical interactions. As a result of these processes, various authigenic minerals are formed. The features of the intra-aqueous medium determine the rate and direction of decomposition of organic matter. During anaerobic mineralization, end products such as carbon dioxide, methane, and hydrogen sulfide are formed, which, together with the physical and chemical characteristics of the environment, affect the formation or dissolution of authigenic minerals (Holmer and Storkholm, 2001; Savvichev et al., 2010).

The balance between the production and destruction of organic matter, along with other factors, determines the characteristics of bottom sediments (Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016; Taran et al., 2018; Strakhovenko et al., 2019). The influence of biogenic processes is manifested both in the geochemical composition of organic-mineral bottom sediments and in the mineral composition. This is particularly pronounced for the bottom sediments of small lakes in the south of Western Siberia in the accumulation of Ca, Mg and Sr in the geochemical composition and the formation of biogenic carbonates of various Mg-content, from low-magnesian calcite to Ca-excess dolomite on geochemical barriers (Ovdina et al., 2020; 2023). As well as in the accumulation of silicon, including biogenic, the supplier of which is diatoms, which dominate phytoplankton and possess silicon frustules.

Despite the abundance of existing bottom sediments classifications (based on genesis, organic content, and practical use) (Korde, 1969; Shtin, 2005; GOST R 54000-2010; Strakhovenko et al., 2019), the task of systematically studying bottom sediments in small lakes in southern Western Siberia remains relevant. This is due to the increasing interest to study small limnosystems, both to expand the fundamental knowledge of sedimentogenesis processes and for practical reasons, such as the use of sapropel materials in the national economy.

The aim of this work is to assess the distribution of organomineral sediments in small lakes in the south of Western Siberia through a comprehensive analysis of abiotic and biotic factors, considering landscape zonation and sapropelation zones.

2. Research objects, materials and methods

The objects of the study are the organic-mineral bottom sediments of 38 small lakes in the south of Western Siberia, located in intensive and weak sapropelation zones in landscapes gradually changing from north to south: subtaiga and southern taiga, forest-steppe, steppe, subzone of ribbon forests (Fig. 1).

Prior to selecting the testing point, we conducted preliminary studies on the lake bottom relief using the Garmin ECHOMAP Plus 62CM echo sounder. Bottom sediment sampling (494 samples) was carried out in the center of the lake from the PVC boat "Stormline Adventure" (South Korea) using a cylindrical sampler ($\varnothing = 82$ mm, $L = 120$ cm) with a vacuum seal (Taifun RPA, Russia). Cylindrical sampler allowed us to collect stratigraphic sediment cores and keep the water-bottom sediment boundary undisturbed. The bottom sediment

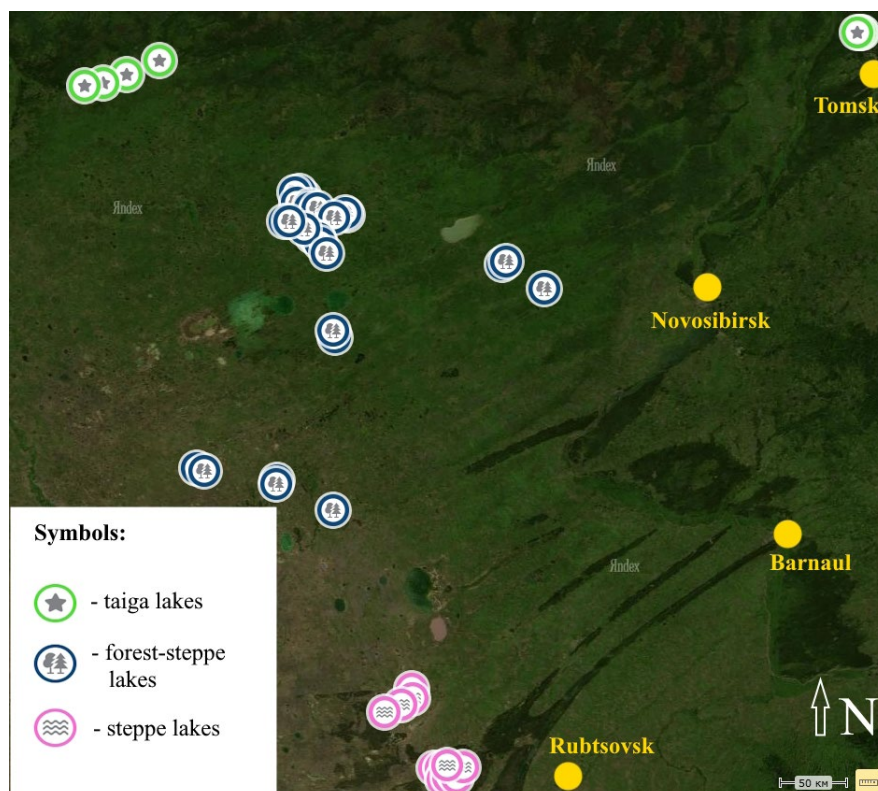


Fig.1. The map diagram of the considered small lakes in the south of Western Siberia.

cores were tested in 5 cm thick layers. The 42 water samples were taken in the center of the lake. Values of the water pH were recorded in situ using an ANION-7000 portable liquid analyzer (Biomer, Russia).

Bottom sediment samples preparation included weighing after collection, followed by drying the samples during the fieldwork to an air-dry state. Then further drying was either in the laboratory under room temperature conditions for Hg content determination or in a drying cabinet (LOIP LF 240/300-VS1, Russia, with the TS87B basic control module) set to 50°C. The samples were thoroughly mixed and reweighed, and then ground for analysis from a standardized volume sample.

Analytical studies of the lake components were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk, Russia. The ash content (A, %) of bottom sediments was studied by calcining 50 g of the sample at 550°C. Ash content is the mass of solid inorganic residue formed after complete combustion of a combustible substance under certain conditions. The ash content allows a qualitative assessment of the organic and mineral matter content in the sample. Major and trace elements were determined via atomic absorption using a Solaar M6 instrument equipped with a Zeeman and deuterium background corrector (Thermo Electron, USA) and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) using iCAP Pro XP Duo (Thermo Scientific, USA). The major element composition was determined by X-ray fluorescence analysis (ARL-9900-XP, Applied Research Laboratories, USA). The total Hg content in the sediments and soil samples was determined according to the accredited methodology M 03-09-2013 using the RA-915M analyzer with RP-91S attachment (Lumex, Russia).

The sample morphology and elemental composition were determined using a scanning electron microscopy (SEM) (Mira 3 Tescan, Tescan, Czech Republic). The INCA Energy 300 program (Labspec 5) was used for quantitative chemical analysis with reference standards. The bottom sediments were analyzed using a "shashka"-type tablets, made of epoxy resin ($\varnothing = 2$ cm, $H = 0.5$ cm) via method, developed by (Malikov, 1986). The process involves filling a sample of sediment with epoxy resin to form compact tablets, followed by polishing with diamond pastes to achieve a perfectly flat surface.

X-Ray Powder Diffraction was used to determine mineral composition (ARLX^{TRA}, Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, USA) (emission $\text{CuK}\alpha$). A detailed description of the calcite-dolomite series carbonates determination is given in (Solotchina et al., 2021; Ovdina et al., 2023). The identification of the main cations and anions of water composition was carried out using liquid ion chromatography (HPLC-10AVp, Shimadzu, Japan).

3. Results and Discussion

The composition of lake waters in the south of Western Siberia varies naturally by landscape zones:

in the subtaiga, bicarbonate calcium-magnesium/sodium-calcium waters predominate; in the forest-steppe, SO_4^{2-} is added to HCO_3^- , and the cationic composition is replaced by sodium-magnesium; in the steppe, Cl-Na^+ brines dominate. This meridional trend of mineralization growth from north to south is complicated by the widespread occurrence of small lakes with sodium bicarbonate (soda) type waters (Strakhovenko et al., 2019; Ovdina et al., 2020). This aspect is related to the hills and hollows relief of the Baraba lowland and Kulunda plain where moisture and salts redistribute and also with the composition of the soil-forming substrates - loess-like loams (Ilyin and Syso, 2001). Soda waters in all areas stimulate the development of biota (algobacterial mats, macrophytes, algae) (Zavarzin, 1993; Strakhov, 1993), which, in turn, enhances the concentration of substances and local environmental changes (Kuznetsov, 2003).

Based on the analysis of more than 38 deposits of organic-mineral bottom sediments from small lakes located in various landscapes of southern Western Siberia, a classification has been proposed that builds upon the approach of N.V. Korde (1969). The sediments are classified based on their ash content into five groups: organogenic (less than 30% ash), organic-mineral (30-50%), mineral-organogenic (50-70%), mineralized (70-85%) and mineral silts (>85%). According to the silicon-calcium ratio, the sediments are further divided into three classes: silicon ($\text{Si} > \text{Ca}$), calcium ($\text{Ca} > \text{Si}$) and mixed ($\text{Si} \approx \text{Ca}$).

Organogenic bottom sediments are extremely rare; organic-mineral and mineral-organogenic are the most common; mineralized bottom sediments are characterized by the predominance of the terrigenous component and the authigenic phases (bio-/chemo-/biochemogenic component). The zone of intensive accumulation of sapropel can be traced in the subtaiga (Vasyugan plain) and forest-steppe landscapes (Baraba lowland). Brackish sapropel and mineral silt are the most common types of bottom sediments on the territory of the Kulunda plain (steppe landscape and ribbon forest subzone) (Fig. 2).

At the same time, the distribution of sapropel classes among all the lakes under consideration is uneven, with the predominance of lakes with a silicon class of sediments. Silicon enters the sediments with both terrigenous deposition and biogenic pathways ($\text{mSiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$). The calcium class is characterized by the accumulation of authigenic carbonates of varying degrees of Mg-content and/or aragonite in the bottom sediments.

Maximum productivity is typical for reservoirs in the intensive zone of sapropelation, where the accumulation of organic matter dominates its decomposition (Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016). Based on many years of detailed field and analytical complex studies, it has been established that the genesis of sapropels is determined by the type of bioproduction (Taran et al., 2018, Strakhovenko et al., 2019): macrophytogenic bottom sediments are rich in lignin and humic substances, planktonogenic ones are rich in proteins and lipids. That is why one of the most important

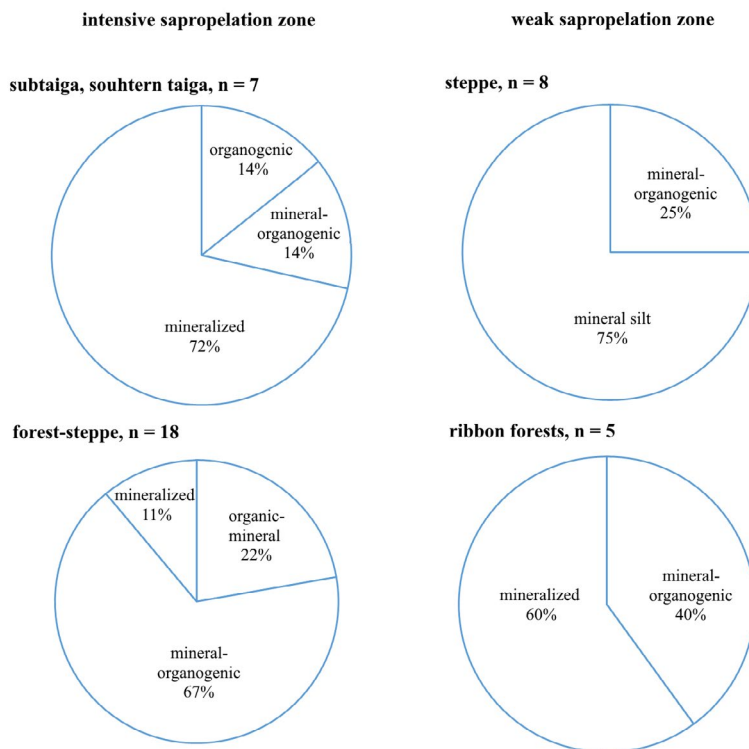


Fig.2. Distribution of types of bottom sediments depending on the landscape and sapropelation zone.

criteria for the systematization of bottom sediments in the south of Western Siberia is the type of dominant primary production: *planktonogenic*, *macrophytogenic*, *planktonic-macrophytic*, *macrophytic-planktonic*.

An interesting fact is that the aquatic ecosystems of neighboring lakes often show noticeable differences in the species composition and organization of communities, which is associated with the unequal participation of biological groups in the synthesis of organic matter (Zarubina, 2013; Yermolaeva et al., 2016). For example, the lakes Peschanoe and Chistoe, located in the forest-steppe zone. Despite the fact that the lakes are located 377 m from each other, the bottom sediments belong to different types, classes and genetic species (Table 1).

The graph (Fig. 3) clearly demonstrates the difference in geochemical conditions in neighboring lakes. Accumulation of Ca and Sr in the calcium sapropel of Lake Peschanoe is traced, which is associated with the development of Ca-accumulating biota that stimulates the formation of calcite-dolomite carbonates. The silicon sapropel of Lake Chistoe contains a higher Si content than the neighboring lake, which is associated with a more extensive development of diatoms and a greater proportion of terrigenous material in the bottom sediment.

Table 1. Classification by types, classes and genetic species of two neighboring lakes (Peschanoe and Chistoe) located in the forest-steppe zone.

Lake	Peschanoe	Chistoe
type	organic-mineral	mineral-organogenic
ash content (%)	49	68
class	Ca	Si
genetic species	planktonic-macrophytic	macrophytic-planktonic

4. Conclusion

A comparison of the prevalence of the types and classes of the considered bottom sediments with sapropelation zones and landscapes of the south of Western Siberia showed that the zone of intensive accumulation of sapropel correlates with subtaiga and forest-steppe landscapes. All types and classes of sapropels are found in the lakes of the forest-steppe landscape. In the steppe zone and the ribbon forest subzone, the most common type of bottom sediments is mineral-organogenic and mineralized sapropel, as well as mineral silt. Regardless of the sapropelation zone and landscape, the type and class of bottom sediments, planktonic-macrophytic and macrophytic-planktonic species are the most common.

The proposed classification (by ash content, Si/Ca ratio, and genetic species) makes it possible to predict the resource potential of sapropels for agriculture and reclamation, and also serves as a basis for monitoring changes in conditions of anthropogenic impact and climatic shifts. The uniqueness of the material composition of the bottom sediments of each individual lake requires detailed geochemical analysis when planning rational use of natural resources.

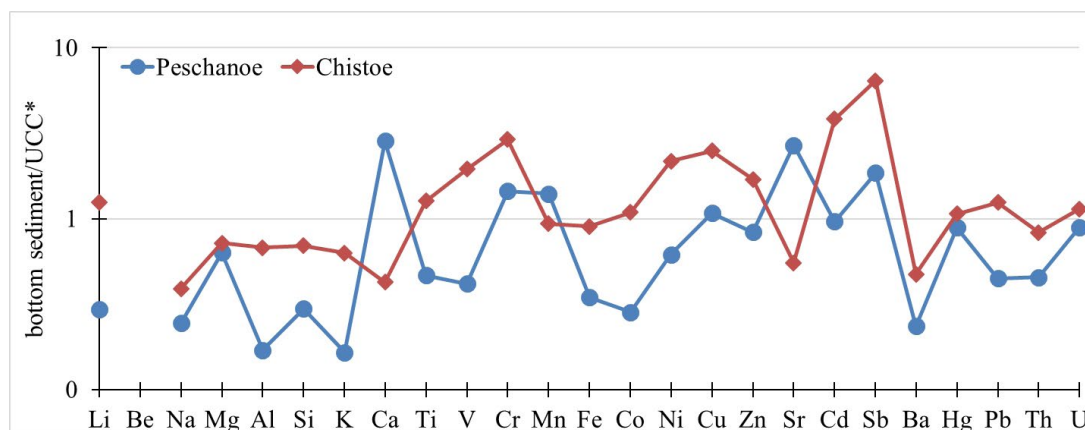


Fig.3. The multi-element distribution spectrum of the studied elements for the bottom sediments of two neighboring lakes (Peschanoe and Chistoe) located in the forest-steppe zone.

Acknowledgement

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 that there is no conflict of interest.

References

GOST R 54000-2010. 2011. Organic fertilizers. Sapropels. General technical conditions. Moscow: Standartinform. (in Russian)

Holmer M., Storkholm P. 2001. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology* 46(4): 431–451. DOI: [10.1046/j.1365-2427.2001.00687.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00687.x)

Ilyin V.B., Syso A.I. 2001. Soil-geochemical provinces in the Ob-Irtysh interfluvium: causes and consequences. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal]* 2: 111–118. (in Russian)

Izmailova A.V., Korneenkova N.Y. 2020. Lake Area Percentage In Russian Federation territory and its governing factors. *Water Resources* 47(1): 13–21. DOI: [10.1134/S009780782001008X](https://doi.org/10.1134/S009780782001008X)

Korde N.V. 1969. Biostratigraphy and typology of Russian sapropels. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences. (in Russian)

Kurakova A.A. 2023. Regionalization of the Ob–Irtysh Basin According to the Conditions of Riverbanks Erosion. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series]* 87(2): 280–294. DOI: [10.31857/S2587556623020061](https://doi.org/10.31857/S2587556623020061) (in Russian)

Kuznetsov V.G. 2003. The evolution of carbonate accumulation in the history of the Earth. Moscow: GEOS. (in Russian)

Malikov Yu.I. 1986. Podgotovka obrazcov k analizu na mikrozonde: metodicheskie rekomendacii [Sample preparation for microprobe analysis: methodological recommendations]. Novosibirsk: Publishing House of IGG SB of the USSR Academy of Sciences. (in Russian)

Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Solotchina E.P. 2020. Authigenic Carbonates in the Water-Biota-Bottom Sediments' System of Small Lakes (South of Western Siberia). *Minerals* 10(6): Art.552. DOI: [10.3390/min10060552](https://doi.org/10.3390/min10060552)

Ovdina E., Strakhovenko V., Malov G. et al. 2023. New Data on the Mineral and Geochemical Composition of

Bottom Sediments in the Tanatar Soda Lakes (Kulunda Plain, Russia). *Russian Journal of Earth Sciences* 5: 1–14. DOI: [10.2205/2023ES000864](https://doi.org/10.2205/2023ES000864)

Savchenko N.V. 1997. Lakes of the southern plains of Western Siberia. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)

Savchenko N.V. 2016. Substantiation of the problem of limnogeosystem dynamics and methodological foundations of its solution. *Simvol nauki: Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal [Symbol of Science: International Scientific Journal]* 5-3 (17): 267–276. (in Russian)

Savvichev A.S., Zakharova E.E., Vesopolova E.F. et al. 2010. Microbial processes of the carbon and sulfur cycles in the Kara Sea. *Oceanology* 50: 893–908. DOI: [10.1134/S0001437010060093](https://doi.org/10.1134/S0001437010060093)

Shtin S.M. 2005. Ozernye sapropeli i osnovy ih kompleksnogo osvoeniya [Lake sapropels and the basics of their integrated development]. Moscow: Publishing House of the Moscow State Mining University. (in Russian)

Solotchina E.P., Kuzmin M.I., Solotchin P.A. et al. 2021. Mineralogical Indicators of Climate Changes in Southwestern Siberia in Holocene Sediments of Bolshie Toroki Lake. *Doklady Earth Sciences* 496: 17–23. DOI: [10.1134/S1028334X21010220](https://doi.org/10.1134/S1028334X21010220)

Strakhov N.M. 1993. Izbrannye trudy. Osadkoobrazovanie v sovremennykh vodoemah [Selected works. Sedimentation in modern reservoirs]. Moscow: Nauka Publ. (in Russian)

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/RGG2019093](https://doi.org/10.15372/RGG2019093)

Taran O.P., Boltenkov V.V., Delii I.V. 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: [10.1134/S0016702918030096](https://doi.org/10.1134/S0016702918030096)

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: [10.1134/S0097807816010073](https://doi.org/10.1134/S0097807816010073)

Zarubina E.Y. 2013. Primary production of macrophytes from three diverse sapropel lakes in the south of Western Siberia (within the Novosibirsk region) in 2012. *Mir Nauki, Kul'tury, Obrazovaniya [The World of Science, Culture, and Education]* 5 (42): 441–444. (in Russian)

Zavarzin G.A. 1993. Epicontinental soda reservoirs as presumed relict biotopes of terrestrial biota formation. *Mikrobiologiya [Microbiology]* 62(5): 789–800. (in Russian)

Систематизация органоминеральных донных отложений малых озёр юга Западной Сибири в контексте ландшафтной зональности

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYОвдина Е.А.* , Страховенко В.Д.^{id} , Малов Г.И.^{id} , Малов В.И.^{id}

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр-т Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведена систематизация органоминеральных донных отложений 38 малых озёр юга Западной Сибири с учётом ландшафтной зональности и зон сапропелеобразования. Исследование охватывает ландшафты подтайги, лесостепи, степи и подзоны ленточных боров, где отобрано 494 пробы донных отложений. Аналитическая работа выполнена в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск) с применением комплекса современных аналитических методов: определение зольности, элементный состав (ААС, ИСП-АЭС, РФА), минералогия (РФА, СЭМ). Для систематизации донных отложений применена разработанная авторами классификация донных отложений на основе зольности (типы), соотношения Si/Ca (классы) и вида доминирующей первичной продукции (генетические виды). Одним из важнейших критериев систематизации донных отложений малых озёр юга Западной Сибири является вид доминирующей первичной продукции: планктоногенный, макрофитогенный, планктоно-макрофитный, макрофито-планктонный. Выявлена связь распределения типов донных отложений с ландшафтами и зонами сапропелеобразования. В подтайге/лесостепи (интенсивная зона сапропелеобразования) преобладают органоминеральные и минерально-органогенные типы. В степи/ленточных борах (зона слабого сапропелеобразования) доминируют минерализованные сапропели и минеральные илы. Органогенные донные отложения крайне редки во всех ландшафтах и зонах сапропелеобразования. Распределение по классам донных отложений среди всех рассмотренных озёр происходит неравномерно, с преобладанием озёр с кремниевым классом отложений. Планктоно-макрофитный и макрофито-планктонный генетические виды являются преобладающими независимо от ландшафта и зоны сапропелеобразования. Установлены локальные особенности геохимического состава в близкорасположенных озёрах на примере озёр Песчаное и Чистое (лесостепь), что обусловлено различиями в генетическом виде сапропеля, обуславливающим геохимический и минеральный составы донных отложений. Предложенная систематизация позволяет оценить ресурсный потенциал сапропелей для сельского хозяйства и рекультивации, а также служит основой для мониторинга антропогенных и климатических воздействий. Уникальность состава донных отложений каждого отдельного озера подчёркивает необходимость детального геохимического анализа при планировании природопользования.

Ключевые слова: сапропель, классификация, генезис, доминирующая первичная продукция, малые озёра, юг Западной Сибири

Для цитирования: Овдина Е.А., Страховенко В.Д., Малов Г.И., Малов В.И. Систематизация органоминеральных донных отложений малых озёр юга Западной Сибири в контексте ландшафтной зональности // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 600-610. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-600

1. Введение

Юг Западной Сибири относится к территории Обь-Иртышского междуречья и является озерным регионом, имеющим широкий диапазон изменения степени заозёрности от бассейна к бассейну в зависимости от степени залесённости и

заболоченности (Куракова, 2023), а средняя величина заозёрности территории составляет ~2% (Измайлова и Корнеенкова, 2020).

Озёрные системы (лимносистемы) юга Западной Сибири — открытые гетерогенные системы, особо чувствительные к изменениям окружающей среды ввиду малых размеров (до 10 км²),

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ovdina@igm.nsc.ru (Е.А. Овдина)

Поступила: 31 июля 2025; Принята: 15 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



мелководности (3–5 м) и бессточности (Савченко, 1997). Каждая лимносистема интегрирует вещество-энергетические компоненты (вода, донные осадки, взвесь, биота, почвы, породы водосбора) и ландшафтные факторы (климат, рельеф), связанные пространственно-функциональными взаимодействиями и развивающиеся как целостный объект (Савченко, 2016 с дополнениями автора). Эти компоненты служат источниками и аккумуляторами аллохтонного и автохтонного вещества, находясь в состоянии непрерывного взаимовлияния через границы раздела фаз и физико-химические поля. Формирование органоминеральных донных отложений в малых озёрах региона — результат взаимодействия лито-, гидро-, атмо- и биосфер, определяющего их уникальный геохимический и минеральный состав.

Органическое вещество выступает важнейшим компонентом в сложных биогеохимических процессах, включая пищевые цепи и химические взаимодействия. В результате этих процессов формируются различные аутигенные минералы. Особенности внутриводоемной среды определяют скорость и направление разложения органического вещества. При анаэробной минерализации образуются такие конечные продукты, как углекислый газ, метан и сероводород, которые совместно с физико-химическими характеристиками среды, влияют на процессы формирования или растворения аутигенных минералов (Holmer and Storkholm, 2001; Саввичев и др., 2010).

Баланс между продукцией и деструкцией органического вещества, наряду с другими факторами, определяет характеристики донных отложений (Зарубина, 2013; Ермолаева и др., 2016; Таран и др., 2018; Страховенко и др., 2019). Влияние биогенных процессов проявляется как в геохимическом составе органоминеральных донных отложений, так и в минеральном составе. Особо ярко для донных отложений малых озёр юга Западной Сибири это выражается в аккумуляции Ca, Mg и Sr в геохимическом составе и формировании биохемогенных карбонатов различной магнезиальности — от низкомагнезиального кальцита до Ca-избыточного доломита на геохимических барьерах (Ovdina et al., 2020; 2023). А также в накоплении кремния, в том числе биогенного, поставщиком которого являются диатомовые водоросли, доминирующие в фитопланктоне и обладающие кремниевыми панцирями.

Несмотря на обилие существующих классификаций донных отложений (по генезису, содержанию органики, практическому назначению) (Кордэ, 1969; Штин, 2005; ГОСТ Р 54000-2010; Страховенко и др., 2019), задача систематизации донных отложений малых озёр юга Западной Сибири с учётом региональной специфики биотических и абиотических факторов остаётся актуальной ввиду все большего интереса к изучению малых лимносистем как для расширения фундаментального знания процессов континентального седиментогенеза, так и для практического назначения — использования сапропеля в народном хозяйстве.

Целью работы является оценка распространённости органоминеральных отложений малых озёр юга Западной Сибири на основе комплексного анализа влияния абиотических и биотических факторов в контексте ландшафтной зональности и зон сапропелеобразования.

2. Объекты исследования, материалы и методы

Объектами исследования являются органоминеральные донные отложения 38 малых озёр юга Западной Сибири, расположенные в интенсивной и слабой зонах сапропелеобразования в постепенно сменяющихся друг друга с севера на юг ландшафтах: подтайга и южная тайга, лесостепь, степь, подзона ленточных боров (Рис. 1).

Прежде чем выбрать точку опробования, мы провели предварительные исследования рельефа дна озера с помощью эхолота Garmin ECHOMAP Plus 62CM. Отбор проб донных отложений (494 пробы) проводился в центре озера с ПВХ-лодки Stormline Adventure с использованием цилиндрического пробоотборника ($\varnothing = 82$ мм, L = 120 см) с вакуумным затвором (НПО «Тайфун», Россия). Цилиндрический пробоотборник позволил нам отобрать 39 стратиграфических кернов отложений и сохранить границу вода-донные отложения ненарушенной. Пробы донных отложений отобраны с интервалом 5 см.

В центре озёр было отобрано 42 пробы воды. Значения pH воды регистрировались *in situ* с помощью портативного анализатора жидкости «АНИОН-7000» (Biomer, Россия).

Подготовка образцов донных отложений включала взвешивание после сбора с последующей сушкой образцов во время полевых работ до воздушно-сухого состояния. Затем проводилась дальнейшая сушка либо в лаборатории при комнатной температуре для определения содержания ртути, либо в сушильном шкафу (LOIP LF 240/300-VS1, Россия, с базовым модулем управления TS87B), настроенном на температуру 50°C. Образцы были тщательно перемешаны и повторно взвешены, а затем измельчены для анализа из образца стандартного объема.

Аналитические исследования компонентов озёр проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск, Россия. Зольность (А, %) донных отложений изучали путем прокалывания 50 г образца при температуре 550°C. Зольность позволяет качественно оценить содержание органических и минеральных веществ в образце. Макро- и микроэлементы определяли методом атомной абсорбции с использованием прибора Solaar M6, оснащенного Зеemanским и дейтериевым корректором фона (Thermo Electron, США) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) с применением iCAP Pro XP Duo (Thermo Scientific, США). Макроэлементный состав определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (ARL-9900-XP, Applied Research Laboratories, США). Общее содержание ртути в образцах донных отложений опре-

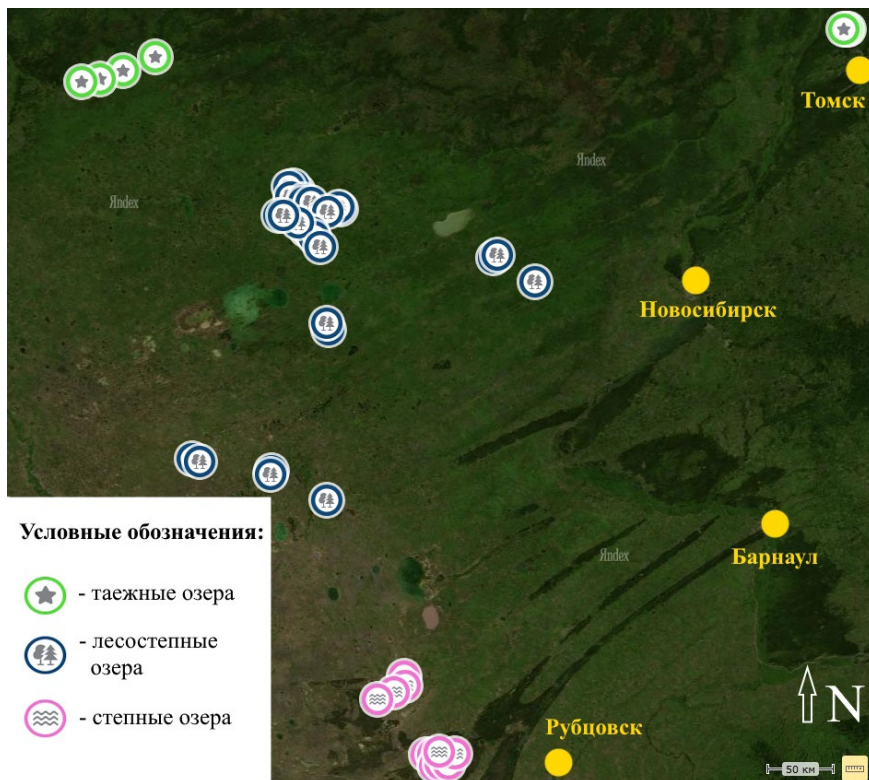


Рис.1. Карта-схема расположения рассмотренных малых озер юга Западной Сибири.

деляли в соответствии с аккредитованной методикой М 03-09-2013 с использованием анализатора RA-915M с приставкой RP-91S (Lumex, Россия).

Морфологию и элементный состав образцов определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (Mira 3 Tescan, Tescan, Чехия). Для количественного химического анализа использовали программу INCA Energy 300 (Labspec 5) с использованием стандартных образцов. Донные отложения анализировали с помощью препаратов типа «шашка», изготовленных из эпоксидной смолы ($\varnothing = 2$ см, $H = 0,5$ см) по методу, разработанному (Маликов, 1986). Для определения минерального состава использовали рентгеновскую порошковую дифракцию (ARLX-TRA, Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, США) (эмиссионный $\text{CuK}\alpha$). Подробное описание определения карбонатов кальцит-доломитового ряда приведено в работах (Солотчина и др., 2021; Ovdina et al., 2023). Определение основных катионов и анионов в составе воды проводили с помощью жидкостно-ионной хроматографии (ВЭЖХ-10AVp, Shimadzu, Япония).

3. Результаты и обсуждение

Состав озёрных вод юга Западной Сибири закономерно изменяется по ландшафтным зонам: в подтайге преобладают гидрокарбонатные кальциево-магниево-натриево-кальциевые воды; в лесостепи к HCO_3^- добавляется SO_4^{2-} , а катионный состав сменяется натриево-магниевым; в степи доминируют $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ рассолы. Этот меридиональный тренд роста минерализации с севера на юг осложняется широким распространением малых озёр с гидрокарбонатно-натриевым (содовым) типом вод (Страховенко и др., 2019; Ovdina et al., 2020), что

связано с грядным рельефом Барабинской низменности и Кулундинской равнины, перераспределяющим влагу и соли, и составом почвообразующих субстратов (лессовидные суглинки) (Ильин и Сысо, 2001). Содовые воды во всех зонах стимулируют развитие биоты (альгобактериальные маты, макрофиты, водоросли) (Заварзин, 1993; Страхов, 1993), что, в свою очередь, усиливает концентрирование веществ и локальные изменения среды (Кузнецов, 2003).

На основе анализа более 35 залежей органоминеральных донных отложений малых озер, расположенных в разных ландшафтах юга Западной Сибири (подтайга, лесостепь, степь, ленточные боры), предложена классификация, развивающая подход Н.В. Кордэ (1969). Донные отложения группируются по значению зольности на: органогенные (<30%), органоминеральные (30–50%), минерально-органогенные (50–70%), минерализованные (70–85%) и минеральные илы (>85%). По соотношению Si/Ca типы донных отложений подразделяются на классы: кремниевый ($\text{Si} > \text{Ca}$), кальциевый ($\text{Ca} > \text{Si}$), смешанный ($\text{Si} \approx \text{Ca}$).

Органогенные донные отложения крайне редки; наиболее распространены органоминеральные и минерально-органогенные; для минерализованных донных отложений характерно преобладание терригенной составляющей и аутигенных фаз (био-/хемо-/биохемогенная составляющая). Зона интенсивного накопления сапропеля прослеживается в подтаежных (Васюганская равнина) и лесостепных ландшафтах (Барабинская низменность). На территории Кулундинской равнины (степной ландшафт и подзона ленточных боров) наиболее распространенным типом донных отложений являются солоноватый сапропель и минеральный ил (Рис. 2).

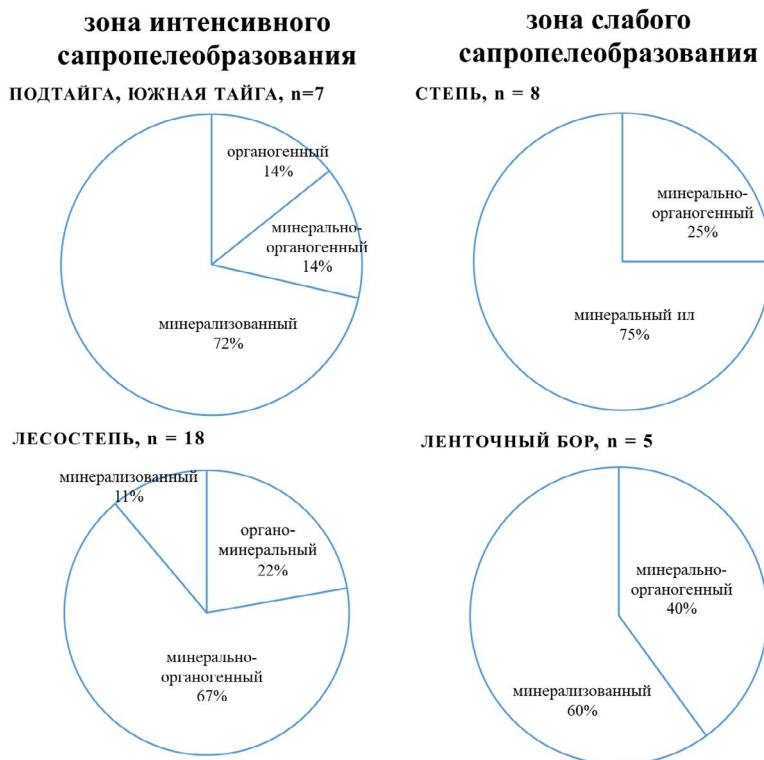


Рис.2. Распределение типов донных отложений в зависимости от ландшафта и зоны сапропелеобразования.

При этом распределение по классам сапропеля среди всех рассмотренных озер происходит неравномерно, с преобладанием озёр с кремниевым классом отложений. Кремний поступает в донные отложения как с терригенным сносом, так и биогенным путем ($mSiO_2 \cdot nH_2O$). Кальциевый класс характеризуется аккумуляцией в донных отложениях аутигенных карбонатов разной степени магнезиальности и/или арагонита.

Максимальная продуктивность характерна для водоёмов интенсивной зоны сапропелеобразования, где аккумуляция органического вещества доминирует над его разложением (Зарубина, 2013; Ермолаева и др., 2016). На основе многолетних детальных полевых и аналитических комплексных исследований установлено, что генезис сапропелей определяется типом биопродукции (Таран и др., 2018, Страховенко и др., 2019): макрофитогенные донные отложения богаты лигнином и гуминовыми веществами, планктоногенные — белками и липидами. Именно поэтому одним из важнейших критериев систематизации донных отложений юга Западной Сибири является вид доминирующей первичной продукции: планктоногенный, макрофитогенный, планктоно-макрофитный, макрофито-планктонный.

Интересным фактом является то, что водные экосистемы соседних озёр часто демонстрируют

заметные различия в видовом составе и организации сообществ, что связано с неодинаковым участием биологических групп в синтезе органики (Зарубина, 2013; Ермолаева и др., 2016).

Например, озера Песчаное и Чистое, расположенные в лесостепной зоне. Несмотря на то, что озера располагаются в 377м друг от друга, донные отложения относятся к разным типам, классам и генетическим видам (Таблица 1).

График (Рис. 3) наглядно демонстрирует различие геохимических условий в соседних озёрах. Прослеживается аккумуляция Ca и Sr в кальциевом сапропеле оз. Песчаное, что связано с развитием Ca-аккумулирующей биоты, стимулирующей формирование карбонатов кальцит-доломитового ряда. В кремниевом сапропеле оз. Чистое прослеживается более высокое, по сравнению с соседним озером, содержание Si, что связано с более обширным развитием диатомовых водорослей и большей долей терригенного материала в донном осадке.

4. Заключение

Сопоставление распространенности типов и классов рассмотренных донных отложений с зонами сапропелеобразования и ландшафтами юга Западной Сибири показало, что зона интенсивного накопления сапропеля коррелирует с подтаежными

Таблица 1. Классификация по типам, классам и видам двух соседних озёр (Песчаное и Чистое), расположенных в лесостепной зоне.

Озеро	Песчаное	Чистое
тип	органоминеральный	минерально-органогенный
зольность (%)	49	68
класс	кальциевый	кремниевый
генетический вид	планктоно-макофитный	макрофито-планктонный

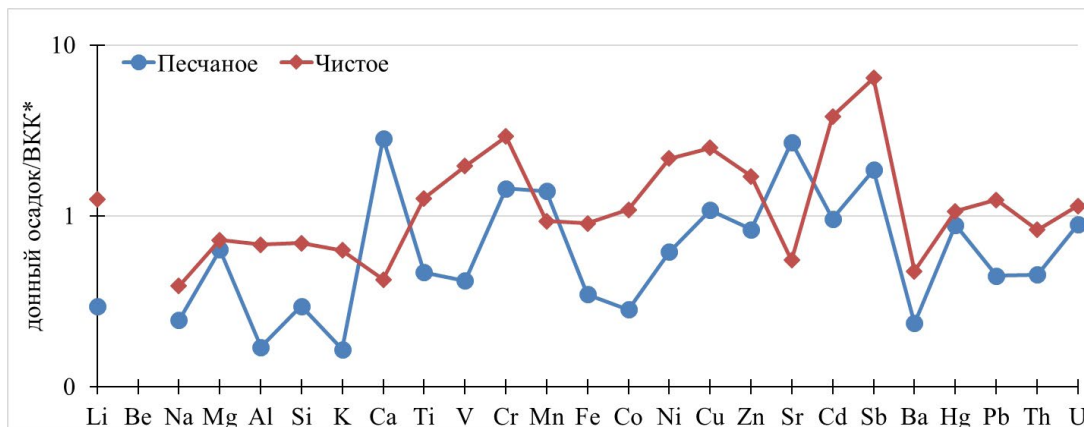


Рис.3. Мультиэлементный спектр распределения изученных элементов для донных отложений двух соседних озер (Песчаное и Чистое), расположенных в лесостепной зоне.

и лесостепными ландшафтами. В озерах лесостепи встречаются все типы и классы сапропелей. В зоне степи и подзоне ленточных боров наиболее распространенным типом донных отложений является минерально-органогенный и минерализованный сапропель, а также минеральный ил. Вне зависимости от зоны сапропелеобразования и ландшафта, типа и класса донных отложений, наиболее распространены планктоно-макрофитный и макрофито-планктонный виды.

Предложенная классификация (по зольности, соотношению Si/Ca и типу биопродукции) позволяет прогнозировать ресурсный потенциал сапропелей для сельского хозяйства и рекультивации, а также служит основой для мониторинга изменений в условиях антропогенного воздействия и климатических сдвигов. Уникальность вещественного состава донных отложений каждого отдельного озера требует детального геохимического анализа при планировании рационального природопользования.

Благодарности

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

ГОСТ Р 54000-2010. 2011. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ.

Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Романов Р.Е. и др. 2016. Гидробиологические условия формирования сапропелей в озерах юга Западной Сибири. *Водные ресурсы* 43(1): 79–91. DOI: [10.7868/S0321059616010077](https://doi.org/10.7868/S0321059616010077)

Заварзин Г.А. 1993. Эпиконтинентальные содовые водоемы как предполагаемые реликтовые биотопы формирования наземной биоты. *Микробиология* 62(5): 789–800.

Зарубина Е.Ю. 2013. Первичная продукция макрофитов трех разнотипных сапропелевых озер юга Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 году. *Мир Науки, Культуры, Образования* 5 (42): 441–444.

Измайлова А.В., Корнеев Н.Ю. 2020. Озерность территории Российской Федерации и определяющие ее факторы. *Водные ресурсы* 47(1): 16–25. DOI: [10.31857/S0321059620010083](https://doi.org/10.31857/S0321059620010083)

Ильин В.Б., Сысо А.И. 2001. Почвенно-геохимические провинции в Обь-Иртышском междуречье: причины и следствия. *Сибирский экологический журнал* 2: 111–118.

Кордэ Н.В. 1969. Биостратиграфия и типология русских сапропелей. Москва: Изд-во АН СССР.

Кузнецов В.Г. 2003. Эволюция карбоната накопления в истории Земли. Москва: ГЕОС.

Куракова А.А. 2023. Районирование Обь-Иртышского бассейна по условиям размыва берегов рек. *Известия РАН. Серия географическая* 87(2): 280–294. DOI: [10.31857/S2587556623020061](https://doi.org/10.31857/S2587556623020061)

Маликов Ю.И. 1986. Подготовка образцов к анализу на микрозонде: методические рекомендации. Новосибирск: Изд-во ИГТ СО АН СССР.

Саввичев А.С., Захарова Е.Е., Веслополова Е.Ф. и др. 2010. Микробные процессы циклов углерода и серы в Карском море. *Океанология* 50(6): 942–957.

Савченко Н.В. 1997. Озера южной равнины Западной Сибири. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН.

Савченко Н.В. 2016. Обоснование проблемы динамики лимногеосистем и методические основы ее решения. *Символ науки: международный научный журнал* 5-3 (17): 267–276.

Солотчина Э.П., Кузьмин М.И., Солотчин П.А. и др. 2021. Минералогические индикаторы изменений климата юга Западной Сибири в голоценовых осадках озера Большие Тороки. *Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле* 496(1): 22–29. DOI: [10.31857/S2686739721010229](https://doi.org/10.31857/S2686739721010229)

Страхов Н.М. 1993. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. Москва: Наука.

Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов Г.И. и др. 2019. Генезис органоминеральных отложений озер центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири). *Геология и Геофизика* 11: 1231–1243. DOI: [10.15372/GiG2019093](https://doi.org/10.15372/GiG2019093)

Таран О.П., Болтенков В.В., Ермолаева Н.И. и др. 2018. Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей. *Геохимия* 3: 269–279. DOI: [10.7868/S001675251803007X](https://doi.org/10.7868/S001675251803007X)

Штин С.М. 2005. Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. Москва: Изд-во Московского государственного горного университета.

Holmer M., Storkholm P. 2001. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biology* 46(4): 431–451. DOI: [10.1046/j.1365-2427.2001.00687.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2001.00687.x)

Ovdina E.A., Strakhovenko V.D., Solotchina E.P. 2020. Authigenic Carbonates in the Water-Biota-Bottom Sediments' System of Small Lakes (South of Western Siberia). *Minerals* 10(6): Art.552. DOI: [10.3390/min10060552](https://doi.org/10.3390/min10060552)

Ovdina E., Strakhovenko V., Malov G. et al. 2023. New Data on the Mineral and Geochemical Composition of Bottom Sediments in the Tanatar Soda Lakes (Kulunda Plain, Russia). *Russian Journal of Earth Sciences* 5: 1–14. DOI: [10.2205/2023ES000864](https://doi.org/10.2205/2023ES000864)