

Biogeochemical features of the formation of Holocene sediments in Lake Dukhovoe (Eastern Baikal)

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYLeonova G.A.¹, Maltsev A.E.^{1*}, Kondratieva L.M.², Krivonogov S.K.¹¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, av. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk, 630090, Russia² Institute for Water and Environmental Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, st. Dikopoltseva 56, Khabarovsk, 680000, Russia

ABSTRACT. A 6-meter core of Holocene sediments from Lake Dukhovoe was studied. As shown by the radiocarbon dating of lacustrine sediments, Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene (10 cal ka BP). The upper 180 cm of sediment is represented by sapropel, and the boundary of lake sediments is at 293 cm. This is an early stage of lake evolution, devoid of biogenic sedimentation. The microbiological studies of the sediment were carried out, which showed a high total number of heterotrophic bacteria in the upper (0–15 cm) and deeper (110–180 cm) sapropel intervals. Mineral bottom sediments (180–293 cm) are characterized by the presence of groups of phosphorus-reducing and ferromanganese bacteria. The contents of Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr and Cr in sapropel are within the average concentrations for the earth's crust, and U and Mo exceed them.

Keywords: age model, Holocene, sapropel, microorganisms, transformation of organic matter, biogeochemistry

For citation: Leonova G.A., Maltsev A.E., Kondratieva L.M., Krivonogov S.K. Biogeochemical features of the formation of Holocene sediments in Lake Dukhovoe (Eastern Baikal) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 352-357. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-352

1. Introduction

The fact that the formation of organogenic bottom sediments (sapropels) in continental lakes at the stage of early diagenesis is understudied makes this problem extremely urgent both in theoretical and practical aspects (Melenevskii et al., 2015; Maltsev et al., 2019). Sapropels are characteristic deposits of lakes in the temperate zone and are closely related to natural zonality, which determines the development of biogenic products (Kurzo et al., 2012). Sapropels of modern lakes in the Eastern Baikal region (including Lake Dukhovoe) were formed during the Holocene under conditions of postglacial warming.

2. Materials and methods

Lake Dukhovoe (53°18' N, 108°53' E) is located 18 km south of the mouth of the Barguzin River and 2 km from Lake Baikal at an altitude of 514 m above sea level and 58 m above the Lake Baikal level. The lake is 4.4 km long, 2.3 km wide, and no more than 2.8 m deep. The water area is 6.16 km², and the catch basin is

87.5 km². The ecological conditions characterizing the current state of Lake Dukhovoe (shallow water and lack of water stratification by oxygen and temperature) are favorable for the mass development of phytoplankton groups microscopic in size. It is the main bioproducer of organic matter that forms planktonic sapropel in the lake. In the central part of Lake Dukhovoe, a well was drilled and a core 6.0 m in length and 7.5 cm in diameter was retrieved. This made it possible to study the features of the formation of stratified bottom sediments during the Holocene.

Microbiological studies on determining the abundance and layer-by-layer distribution of various physiological groups of aerobic and anaerobic microorganisms over the depth of the bottom sediment core were carried out at the Institute for Water and Environmental Problems. The characterization of microbial communities was studied by a culturedependent method, which includes planting a suspension of bottom sediments on selective agar media using the limit dilution method. The method of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP AES) was used to determine the concentration of chemical elements in water, sedi-

*Corresponding author.

E-mail address: maltsev@igm.nsc.ru (A.E. Maltsev)

Received: May 20, 2024; Accepted: July 01, 2024;

Available online: August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



ments and biota. The mineral composition was studied by X-ray powder diffractometry on a DRON-4 diffractometer, Cu-K α radiation. Radiocarbon dating of the sediments was carried out at the FSC MIS IGM SB RAS using the scintillation method. Residual carbon activity was measured on a QUANTULUS-1220 liquid scintillation counter. The age was calculated on the basis of half-life of ^{14}C at 5570 years. Further calibrations were performed using CALIB 7.1 (Reimer et al., 2013).

3. Results and discussion

3.1. Age and sedimentation rate

The core of the bottom sediments of Lake Dukhovoe is heterogeneous and has a clear layering. Lake sediments occur in the interval of 0–293 cm. The following layers are distinguished: planktogenic sapropel (0–180 cm), transitional organomineral layer (180–205 cm) and dense mineral silt (205–293 cm), which is underlain by dark gray loose clays with an admixture of unsorted material (293–600 cm).

Fig. 1 shows the linear trend of calibrated radiocarbon dates in the age—depth model. The calibrated dates approximate the linear trend well, except for the date from a depth of 57–62 cm. This one is much younger for some unknown reason and should be excluded from the set as an error. The trend line shows an age of 5.5 cal ka BP for the boundary between the organic and organomineral sediment layers at a depth of 180 cm and ~6 cal ka BP for the boundary between the organomineral and mineral layers at a depth of 205 cm. At a depth of 293 cm, the age of the deposits is estimated at about 10 cal ka BP. The boundary of lake sediments is at 293 cm. An interval of 205–293 cm can be considered as the basal layer representing the early stage of the development of the lake and devoid of biogenic sedimentation. The sediment interval of 0–205 cm contain preserved diatom valves and an increase in the content of structureless OM toward the upper part of the core, thereby demonstrating further biota-enriched stages in the history of the lake. Dating the lacustrine sediments by the radiocarbon method shows that Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene, and the accumulation of sapropel began in the Middle Holocene ~5 cal ka BP and had high sedimentation rates at the early stages of its formation.

3.2. Biogeochemistry of lake sediments

A high total abundance of heterotrophic bacteria (TAHB), which use a wide range of organic compounds as energy and carbon sources, is noted in an upper interval of the section (0–15 cm) and a deeper interval (110–180 cm) (Fig. 2a). The distribution of ammonifying bacteria (AMB), nitrifying bacteria (NB) and denitrifying bacteria (DNB) participating in the nitrogen cycle along the section of bottom sediments allows us to identify 3 stages of decomposition of organic matter (OM). At the first stage of destruction of nitrogen-containing organic substances, which are easily metabolized compounds, AMB are involved, the main waste products of which are NH_4^+ and CO_2 . At the second stage, AMB is

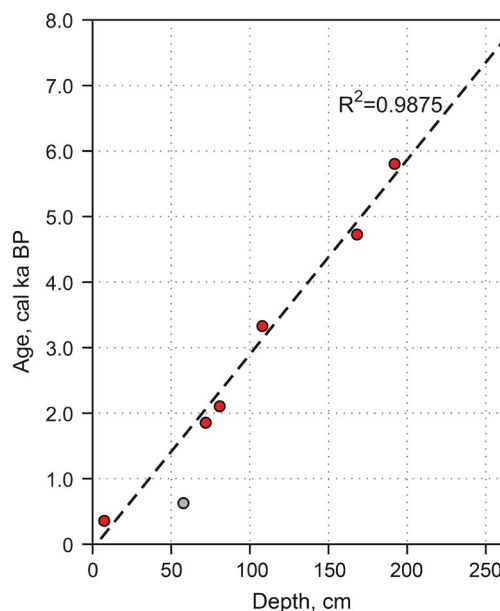


Fig.1. Linear trend of calibrated radiocarbon dates in the age—depth model.

replaced by NB, which carry out step-by-step nitrification. To complete the decomposition of OM, the available oxidized form of nitrogen (NO_3^-) is used — with the participation of DNB, the process of denitrification occurs. In the lower intervals of sapropel, growth of sulfate-reducing bacteria (SRB) is noted. Mineral bottom sediments (180–293 cm) are characterized by the presence of groups of phosphorus-reducing (PRB) and ferromanganese bacteria (FMB) (Fig. 2b).

The distribution of the Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Zr, and Cr concentrations in the sapropel interval (0–180 cm) is quite consistent, the concentrations of these elements increase with depth, but, in general, they are within the average values for the Earth's crust, shales, and oceanic pelagic clays. Fe and Mn are concentrated in the upper (0–10 cm), middle (172–321 cm), and lower (321–540 cm) parts of the bottom sediment section. The S, P, and Mo concentrations in the Lake Dukhovoe sapropel exceed the average concentrations of these elements in the Earth's crust, shales, and oceanic pelagic clays. Sapropel is enriched in P, Ca, Rb, Sr, Mn, Fe, Co, Cu, and Zn. However, in general, the enrichment of sapropel with these elements is low, not exceeding 2–5 average contents in shale. Phytoplankton (forms OM of sapropel) is enriched with phosphorus (biogenic element) and chalcophile elements (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), which characterize the pollution of the modern atmosphere.

Pore waters are transformed during diagenesis. There is an increase in the mineralization of pore water up to 350–470 mg/L compared to lake water (120 mg/L), an increase in the concentrations of biogenic components (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) and a decrease in SO_4^{2-} , which is explained by an increase in the degree of bacterial destruction of OM and forming of pyrite.

According to the X-ray phase analysis, the main minerals in the bottom sediments of Lake Dukhovoe are plagioclase and quartz. The mineral composition of the bottom sediments also contains mica (disordered),

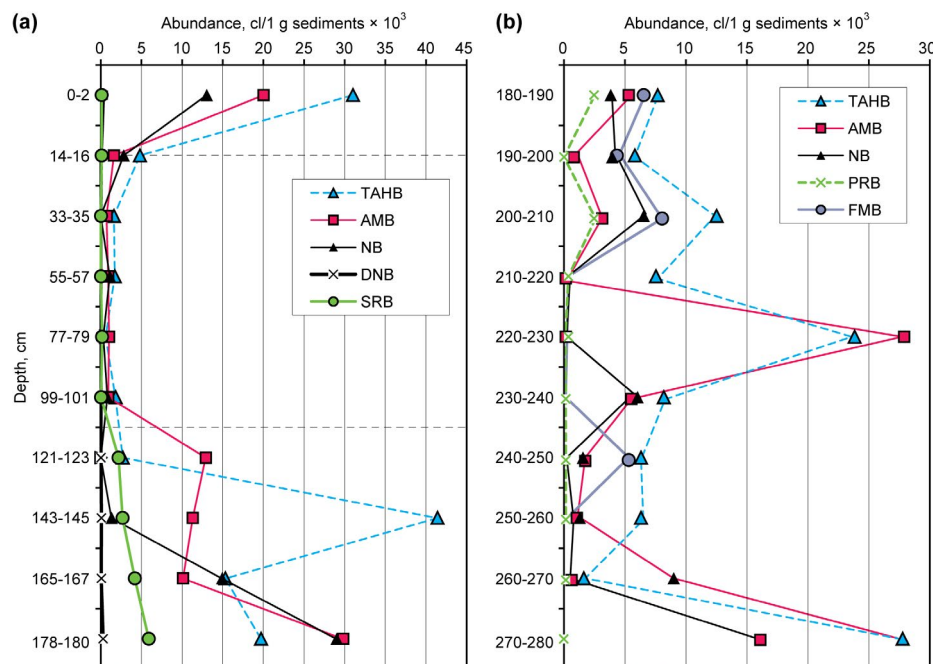


Fig.2. Distribution of physiological groups of bacteria in (a) sapropel (0–180 cm) and (b) mineral sediments (180–293 cm) of Lake Dukhovoe. See abbreviations in the text.

chlorite, and potassium feldspar. The chemical composition of the Lake Dukhovoe sapropel is dominated by SiO_2 , whose average content is 15%. The average contents of Al_2O_3 and Fe_2O_3 in the sapropel section are 4.2 and 5.6%, respectively; the CaO content is 1.2%; the abundance of MgO, Na_2O , and K_2O does not exceed 1%. The $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratio is low (0.2), which clearly demonstrates geochemical specificity — carbonate-free planktonogenic sapropel.

4. Conclusion

As shown by the radiocarbon dating of lacustrine sediments, Lake Dukhovoe was formed in the Early Holocene (10 cal ka BP) and the sapropel accumulation began in the Middle Holocene (~5 cal ka BP). A high total number of heterotrophic bacteria was revealed in the upper and deeper intervals of sapropel. The mineral composition of the Lake Dukhovoe sapropel is dominated by SiO_2 . The low value of the $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ratio (0.2) clearly demonstrates the geochemical specificity of sapropel, i.e. carbonate-free planktonogenic. The contents of Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr and Cr in sapropel are within the average concentrations for the earth's crust, and U and Mo exceed them. Phytoplankton is enriched with P and chalcophile elements (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), which characterize the pollution of the modern atmosphere of the Baikal region. There is an increase in the mineralization of pore water compared to lake water, an increase in the concentrations of biogenic components (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) and a decrease in SO_4^{2-} .

Acknowledgements

Work is done on state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS), Projects No 122041400193-7. The reported study was funded by RFBR according to the research Project No 11-05-00655_a. Analytical studies were conducted in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research IGM SB RAS.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Kurzo B.V., Gaidukevich O.M., Zhukov V.K. 2012. Researches in the field of genesis, resources and development of sapropel deposits in Belarus. *Prirodopol'zovanie* 22: 57–66. (in Russian)
- Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A., et al. 2019. Geochemistry of Sapropels in Holocene Sections from Small Lakes in the South of Western Siberia and Eastern Baikal Region. Novosibirsk, Akad. Izd. Geo. (in Russian)
- Melenevskii V.N., Leonova G.A., Bobrov V.A. et al. 2015. Transformation of organic matter in the Holocene sediments of Lake Ochki (south Baikal region): Evidence from pyrolysis data. *Geochem. Int.* 53(10): 903–921. doi: 10.1134/S0016702915080054
- Reimer P. J., Bard E., Bayliss A. et al. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55(4): 1869–1887. doi: [10.2458/azu.js.rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu.js.rc.55.16947)

Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений озера Духовое (Восточное Прибайкалье)

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYЛеонова Г.А.¹, Мальцев А.Е.^{1*}, Кондратьева Л.М.², Кривоногов С.К.¹¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия²Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, 56, Хабаровск, 680000, Россия

АННОТАЦИЯ. Изучен 6-метровый керн голоценовых отложений оз. Духовое. Согласно радиоуглеродным датам, озеро образовалось ~10 кал. тыс. л. н. Верхние 180 см осадка представлены сапропелем, а граница озерных отложений находится на отметке 293 см — это ранний этап развития озера, лишенный биогенной седиментации. Проведены послойные микробиологические исследования осадка, которые показали высокую общую численность гетеротрофных бактерий в верхнем (0–15 см) и более глубоком (110–180 см) интервалах сапропеля. Для минеральных отложений (180–293 см) характерно присутствие групп фосфор редуцирующих и железо-марганцевых бактерий. Содержания Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr и Cr в сапропеле находятся в пределах средних концентраций для земной коры, а U и Mo — превышают таковые.

Ключевые слова: возрастная модель, голоцен, сапропель, микроорганизмы, трансформация органического вещества, биогеохимия

Для цитирования: Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Кондратьева Л.М., Кривоногов С.К. Биогеохимические особенности формирования голоценовых отложений озера Духовое (Восточное Прибайкалье) // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 352-357. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-352](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-352)

1. Введение

Недостаточная изученность формирования органогенных донных отложений (сапропели) в континентальных озерах ставит эту проблему в ряд чрезвычайно актуальных как в теоретическом, так и практическом, аспектах (Меленевский и др., 2015; Мальцев и др., 2019). Сапропели являются характерными отложениями озер умеренного пояса и тесно связаны с природной зональностью, определяющей развитие той или иной биогенной продукции (Курзо и др., 2012). Сапропели современных озер Восточного Прибайкалья, в том числе и оз. Духовое, формировались в течение голоцена в условиях послеледникового потепления.

2. Материалы и методы

Оз. Духовое (53°18' с.ш., 108°53' в.д.) расположено в Южном Прибайкалье на восточном борту Байкальской впадины, на высоте 514 м над уровнем моря и 95 м над уровнем Байкала, его длина составляет 2500 м, а ширина — 1600 м, глубина не более 2.8 м. Экологические условия, характери-

зующие современное состояние озера, благоприятны для массового развития микроскопических по размерам группировок фитопланктона, который является основным биопродуцентом органического вещества, формирующего в озере планктоногенный сапропель. В центральной части оз. Духовое была пробурена скважина и поднят непрерывный керн с ненарушенной структурой длиной ~6 м, что позволило изучить особенности формирования вскрытой толщи стратифицированных отложений на протяжении голоцена.

Характеристика микробных сообществ изучалась с использованием культурально-зависимого метода, включая посев суспензии донных отложений на селективные агаризованные среды с использованием метода предельного разбавления в Институте водных и экологических проблем ДВО РАН. Метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ИСП АЭС) применяли для определения в воде, донных отложениях и биоте концентрации химических элементов. Минеральный состав исследован методом рентгеновской порошковой дифрактометрии на дифрактометре ДРОН-4, излучение Cu-K α . Радиоуглеродное

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: maltsev@igm.nsc.ru (А.Е. Мальцев)

Поступила: 20 мая 2024; Принята: 01 июля 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



датирование отложений выполнено в ЦКП МИИ СО РАН сцинтилляционным методом. Остаточную углеродную активность измеряли на жидкостном сцинтилляционном счетчике QUANTULUS-1220. Возраст был рассчитан на основе периода полураспада ^{14}C в 5570 лет. Дальнейшие калибровки были выполнены с помощью CALIB 7.1 (Reimer et al., 2013).

3. Результаты

3.1. Возраст и скорости осадконакопления

По вещественному составу керн донных отложений оз. Духовое неоднороден и имеет четкую слоистость. Озерные отложения залегают в интервале 0–293 см. Выделяются следующие слои: планктоногенный сапропель (0–180 см), переходный органоминеральный слой (180–205 см) и плотный минеральный ил (205–293 см), который подстилают темно-серые рыхлые глины с примесью несортированного материала (293–600 см).

На рисунке 1 представлен линейный тренд калиброванных радиоуглеродных дат в модели возраст—глубина. Калиброванные даты хорошо аппроксимируют линейный тренд, за исключением даты с глубины 57–62 см, которая по неизвестной причине значительно моложе и должна быть исключена из набора как ошибка. Линия тренда показывает возраст 5.5 кал. тыс. л. н. для границы между органическим и органоминеральным слоями отложений на глубине 180 см и ~6 кал. тыс. л. н. для границы между органоминеральным и минеральным слоями на глубине 205 см, на глубине 293 см возраст отложений оценивается около 10 кал. тыс. л. н. Граница озерных отложений находится на отметке 293 см, а интервал 205–293 см можно рассматривать как базальный слой, представляющий ранний этап развития озера, лишенный биогенной седиментации. Интервал отложений 0–205 см содержит в себе сохранившиеся створки диатомовых водорослей и увеличивающееся к верхней части керна содержание бесструктурного органического вещества, демонстрируя, тем самым, дальнейшие обогащенные биотой этапы истории развития озера. Датирование озерных отложений показывает, что оз. Духовое сформировалось в раннем голоцене, а накопление сапропеля началось в среднем голоцене ~5 кал. тыс. л. н. и на ранних этапах своего формирования имело высокие скорости осадконакопления.

3.2. Биогеохимия озерных отложений

Высокая общая численность гетеротрофных бактерий (ОЧГБ), использующих в качестве источников углерода широкий спектр органических соединений отмечена в верхнем (0–15 см) и более глубоком интервале (110–180 см) сапропеля (Рис. 2а). Распределение по разрезу донных отложений оз. Духовое аммонифицирующих (АМБ), нитрифицирующих (НБ) и денитрифицирующих бактерий (ДНБ), участвующих в цикле азота, позволяет выявить 3 стадии деструкции органического

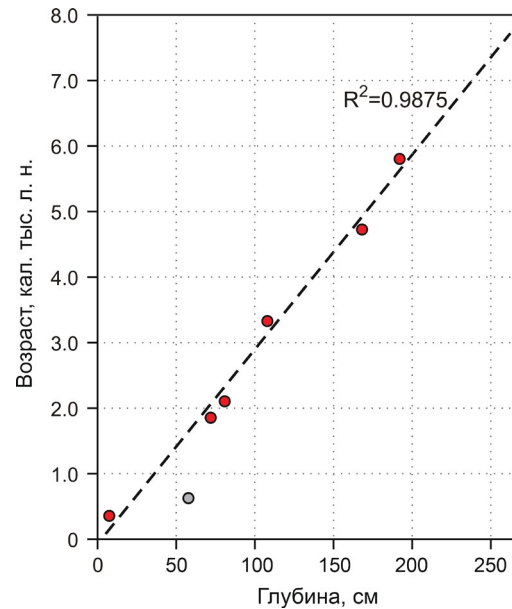


Рис.1. Линейный тренд калиброванных радиоуглеродных дат в модели возраст—глубина.

вещества (ОВ). На первом этапе деструкции азотсодержащих органических веществ, относящихся к легко метаболизируемым соединениям, участвуют АМБ, основными продуктами жизнедеятельности которых являются ионы аммония и углекислого газа. На втором этапе на смену АМБ приходят НБ, которые осуществляют поэтапную нитрификацию. Для завершения деструкции ОВ используется имеющаяся в наличии окисленная форма азота (NO_3^-) — происходит процесс денитрификации при участии ДНБ. В нижних интервалах сапропеля отмечается рост сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). Для минеральных донных отложений (180–293 см) характерно присутствие групп фосфор редуцирующих (ФРБ) и железо-марганцевых бактерий (ЖМБ) (Рис. 2б).

Распределение концентраций Na, Mg, Al, Si, Ca, Zr и Sr достаточно выдержанны в сапропеле (0–180 см), с глубиной концентрации этих элементов увеличиваются, но в целом, находятся в пределах средних значений для земной коры, глинистых сланцев и океанических глин. Fe и Mn концентрируются в верхней (0–10 см), средней (172–321 см) и нижней (321–540 см) частях разреза. Содержания S, P, Mo, U в сапропеле превышают средние концентрации этих элементов в земной коре, глинистых сланцах и океанических глинах. Рассчитанные коэффициенты обогащения (EF) показали, что сапропель незначительно ($\text{EF} = 2\text{--}5$) обогащен P, Ca, Rb, Sr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, что не превышает средние содержания в глинистых сланцах. Фитопланктон (продуцент ОВ сапропеля), напротив, обогащен P (биогенный элемент) и халькофильными элементами — Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu, характеризующими загрязненность современной атмосферы.

В результате диагенетических процессов, протекающих в сапропелевой толще, происходит трансформации поровых вод. Наблюдается рост минерализации поровых вод до 350–470 мг/л по сравнению с озерной водой (120 мг/л), увеличе-

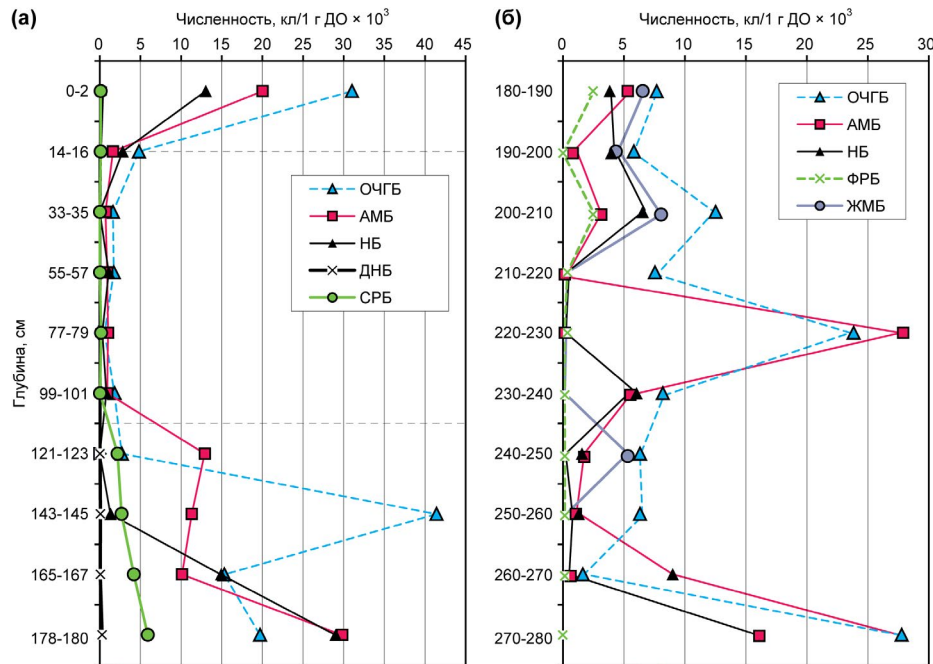


Рис.2. Послойное распределение физиологических групп бактерий в (а) сапропеле (0–180 см) и (б) минеральных осадках (180–293 см) оз. Духовое. Сокращения см. в тексте.

ние концентраций биогенных компонентов (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) и уменьшение SO_4^{2-} . В результате возрастания степени бактериальной деструкции органического вещества SO_4^{2-} расходуется на образование пирита.

Основными минералами в донных отложениях оз. Духовое являются плагиоклаз и кварц, также присутствуют слюда (разупорядоченная), хлорит, калиевый полевой шпат. В следовых количествах присутствуют амфибол. В минеральном составе сапропеля преобладает SiO_2 , средние содержания которого составляют 15%, далее идут Al_2O_3 и Fe_2O_3 с концентрациями 4.2 и 5.6% соответственно, CaO — 1.2%, а MgO , Na_2O , K_2O не превышают 1%. Значение отношения $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ показывает степень «карбонатности» осадка. Это отношение в оз. Духовое невысокое (0.2), что наглядно демонстрирует геохимическую специфику осадка — бескарбонатный планктоногенный сапропель.

4. Заключение

Датирование озерных отложений показало, что озеро сформировалось в раннем голоцене около 10 кал. тыс. л. н., а накопление сапропеля началось в среднем голоцене ~5 кал. тыс. л. н. Высокая общая численность гетеротрофных бактерий выявлена в верхнем и более глубоком интервалах сапропеля. Отношение $\text{CaO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ невысокое (0.2), что указывает на геохимическую специфику осадка — бескарбонатный сапропель. Содержания Na, Mg, Al, Si, Al, Ca, Fe, Mn, Zr и Cr в сапропеле находятся в пределах средних концентраций для земной коры, а U и Mo — превышают таковые. Фитопланктон обогащен фосфором и халькофильными элементами (Zn, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Cu), характеризующими загряз-

ненность современной атмосферы Прибайкалья. В результате диагенетических процессов происходит трансформации поровых вод — рост минерализации, биогенных компонентов (HCO_3^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-}) и уменьшение SO_4^{2-} .

5. Финансирование

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН № 122041400193-7, при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 11-05-00655_а. Аналитическая работа выполнена в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Курзо Б.В., Гайдукевич О.М., Жуков В.К. 2012. Исследования в области генезиса, ресурсов и освоения месторождений сапропеля Беларуси. Природопользование 22: 57–66.
 Мальцев А.Е., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др. 2019. Геохимия сапропелей голоценовых разрезов из малых озер юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья. Новосибирск, Академ. изд-во Гео.
 Меленевский В.Н., Леонова Г.А., Бобров В.А. и др. 2015. Трансформация органического вещества в голоценовых осадках озера Очки (Южное Прибайкалье) по данным пиролиза. Геохимия 10: 925–944.
 Reimer P. J., Bard E., Bayliss A. et al. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. Radiocarbon 55(4): 1869–1887. DOI: [10.2458/azu_js_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947)