

Vertical distributions of dissolved methane into bottom sediments from background areas of Lake Baikal



Ivanov V.G.*^{ORCID}, Khabuev A.V.^{ORCID}

Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. Vertical distributions of dissolved methane and this flux into bottom sediments (up to 3 m thickness) from background (undisturbed sedimentation) areas of the Southern, Middle and Northern basins of Lake Baikal were obtained and characterized. Vertical methane profiles at all stations are similar characteristics: low concentrations in the near-surface layers ($\leq 1\text{--}2\ \mu\text{M}$) and a steady increase with depth. The highest concentrations of methane into sedimentary were observed in the Middle basin, followed by somewhat lower levels in the Southern, and concentrations an order of magnitude lower in the Northern basin. The exponential decrease in methane concentrations toward to the bottom–water interface to equally low values, regardless of its content within the sediment, indicates its significant oxidation and consequently minimal influence on methane concentrations at the near-bottom water interface. The obtained results fill a gap in knowledge concerning the vertical distribution of methane into baikalian bottom sediments and are important for assessing the stability and functioning of hydrocarbon systems in a cold and deep freshwater reservoir.

Keywords: methane concentration, bottom sediments, diffusive flux, headspace equilibration method, Baikal

For citation: Ivanov V.G., Khabuev A.V. Vertical distributions of dissolved methane into bottom sediments from background areas of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 6. - P. 1390-1401. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-6-1390

1. Introduction

In the context of global climate change, quantifying the concentrations and distribution of greenhouse gases in the ocean and inland water bodies is of scientific and applied interest. Since the late 20th century, attention to methane in aquatic ecosystems has increased because of its role in atmospheric chemistry and, in particular, in ozone layer depletion processes (Bazhin, 2003). Studying the conditions of formation and distribution patterns of methane in bottom sediments of various types of water bodies has also traditionally been used as an exploration criterion for petroleum potential areas. Interest has recently grown further due to the demonstrated utility of dissolved methane concentrations as indicators of anthropogenic or natural pollution in aquatic environments.

Gases in the bottom sediments of Lake Baikal have been studied in different time periods (Efremova and Gritchina, 1981; Lebed', 1984; Isaev and Mikheev, 2001). The first detailed studies were conducted

by VNIIGAZ researchers A.G. Efremova and M.V. Andreeva with participation from LIN SB RAS in 1978. In the 1980s, extensive geochemical studies in the Selenga shallow area under the direction of G.G. Lebed' revealed high gas saturation of the upper sediment layer with methane (up to $10\text{--}25\ \text{cm}^3\ \text{kg}^{-1}$), especially in the Proval Bay. The authors noted a direct correlation between hydrogen and methane concentrations and low concentrations of heavy hydrocarbon (HH) gases. Later studies showed the presence of nitrogen and methane gas types, as well as intermediate types, in the bottom sediments (Isaev et al., 2002). Among HH gases, the presence of ethane, propane, ethylene, and propylene was noted (Isaev et al., 2002). Methane concentrations in the near-bottom waters of the Baikal, are very low ($\sim 10\text{--}40\ \text{nl/L}$) that is similar to the World Ocean, (Egorov, 2002; Egorov et al., 2003; Egorov et al., 2005; Mizandrontsev et al., 2020).

The vertical distribution of methane in Lake Baikal's bottom sediments is of particular interest due to the lake's great depth, which results in sedimentation

*Corresponding author. E-mail address: vigo@lin.irk.ru (V.G. Ivanov)

Received: November 24, 2025;

Accepted after revised: December 19, 2025;

Available online: December 25, 2025

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



conditions approaching those of marine environments. Nevertheless, existing information on the patterns of its vertical distribution in the bottom sediments of different lake basins is very limited, as historically the main focus has been on methane in zones of gas-bearing fluid discharge and in various types of hydrates-bearing geological structures (Kalmychkov et al., 2006). Thus, distribution of methane into bottom sediments of the Academician Ridge (background areas) has been described in detail (Zemskaya et al., 2008). Other studies were limited to measuring methane content only in the uppermost surface sediment layers (Gar’kusha et al., 2019; Och et al., 2012).

Thus, the aim of this work was to measure and analyze the vertical distribution of methane concentrations into bottom sediments from background areas in the three basins of Lake Baikal.

2. Materials and methods

Study Areas

The Baikal depression are clearly distinguished: Southern, Middle, and Northern (Fig. 1). Southern and Middle Baikal are identified as independent deep-water formations, separated by the Buguldeyka saddle. Northern Baikal is distinguished by shallower depths and a number of features in the basement geological structure. It is separated from Middle Baikal by an inter-basin saddle, including subaerial and subaqueous fragments (Mats et al., 2001). These, in turn, are heterogeneous in internal structure and consist of smaller depressions differing in their tectonic development and sedimentation (Levi et al., 1997).

Background areas of Lake Baikal can be defined as areas of the bottom with continuous sedimentation, undisturbed by tectonic activity or fluid discharge, i.e., where there is no displacement or redeposition of bottom sediments. Such areas include leveled central parts of the basins or on inter-basin saddles. For the former, the presence of turbidites is an anomaly in the continuity of sedimentation conditions, which should be considered in the analysis of results.

Sampling and Analysis Methods

Sediment cores were collected during June–July from 2017 to 2023 (Fig. 1, Table 1). Gravity coring with a straight-through steel tube (outer diameter 127 mm) was conducted from the research vessel “G.Yu.

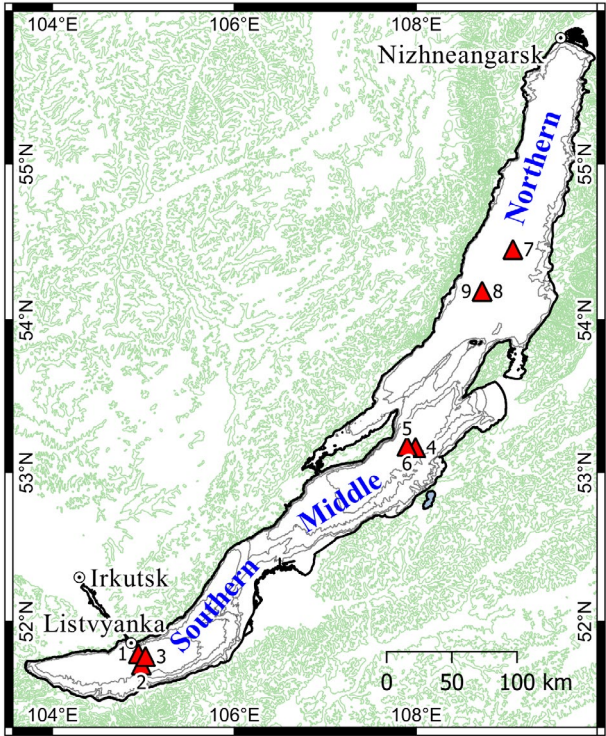


Fig.1. The map of core sampling (Table 1).

Vereshchagin”. A plastic liner (inner diameter 110 mm) was inserted into the corer to retain the recovered sediment. After retrieval on board, the liner was cut to obtain a continuous geological section of bottom sediments up to 3.5 meters long.

Samples for analysis were collected using a truncated 3 ml syringe. Methane content was determined using the headspace phase-equilibrium degassing method (Bolshakov and Egorov, 1987). For this, a 2 ml sediment sample was placed in a 33 ml glass vial filled with 20 ml of distilled water. The vial was sealed with an aluminum cap with a rubber septum, turned over, and mechanically shaken for 30 minutes to disintegrate the sediment and achieve maximum degassing.

A gas aliquot was extracted through the hole by syringe and analysed on board by gas chromatography using an “ECHO-EW-PID” gas chromatograph (Russia) with a flame ionization detector. The chromatograph was calibrated against the “Nitrogen” standard (N₂+1000 ppm CH₄) from LLC “PGS-Service” (Zarechny city, Russia).

Table 1. Sampling dates, coordinates and water depths for the stations in three basins of Lake Baikal.

N	Sampling date	Latitude, deg	Longitude, deg	Basin	Station	Depth, m
1	12.07.2018	51.779882	104.945453	Southern	7 km Listvyanka	1400
2	20.07.2019	51.702595	104.978775		Listvyanka-Tankhoy	1400
3	16.06.2022	51.76009	105.024683		9 km Listvyanka	1400
4	30.06.2017	53.165472	107.993900	Middle	Izhimei	1610
5	13.07.2019	53.17378	107.900228		Izhimei	1610
6	09.07.2023	53.173768	107.900068		Izhimei	1610
7	02.07.2017	54.455308	109.064938	Northern	Elokhin-Davsha	900
8	16.07.2019	54.186112	108.72612		Zavorotny	900
9	16.07.2020	54.186112	108.72612		Zavorotny	900

The relative analytical error in determining methane concentration in the gas sample was $\pm 5\%$; the combined uncertainty, including potential partial degassing during core handling, were assumed to be $\pm 10\%$.

3. Results

Measured methane concentrations in sediments from different basins are shown in Fig. 2. Methane content in different cores varied widely, from fractions to hundreds of $\mu\text{mol/L}$. Methane content profiles in all lake basins show a significant increase with depth. In Southern and Middle Baikal, saturation was reached at core layers deeper than 1.2-2.0 meters, below these depths, concentrations varied around the achieved values (about 300-700 $\mu\text{mol/L}$) down to the deepest sampled horizons. The highest concentrations of methane into sedimentary were observed in the Middle basin, followed by somewhat lower levels in the Southern, and concentrations an order of magnitude lower in the Northern basin.

An exponential decrease in concentrations predominated approaching toward to the sediment surface. Thus, concentrations in the basins did not exceed 1-2 $\mu\text{mol/L}$ at the sediment surface, with uniform methane concentration at stations in the Northern basin. The increase in methane concentration occurred toward to bottom from 25-50 cm (Fig. 2).

4. Discussion

The dissolved methane profiles obtained in Lake Baikal sediments show a vertical distribution typical for its background areas: low methane concentrations in the upper centimeters of sediment, uniform with depth or with an exponential decrease toward the water boundary, and a pronounced, near-linear increase with depth, reaching quasi-homogeneous values at some stations (3, 4, 5, 6) at depths of 1.5–2.0 m (Fig. 2). The profile at station 2 displays a marked inflection at

~1.2 m, beyond which the rate of methane concentration increase accelerates. A similar inflection was also observed in the sediments of the Academic Ridge, but at a depth of 2.4 m (Zemskaya et al., 2008).

It should be noted that methane concentration profiles obtained in the same area in different years coincide quite well both in shape and in absolute values (profile pairs 1, 3; 5, 6 and 7, 9 in Fig. 2). Given the 3-4 year intervals between samplings, it can be concluded that the processes of methane generation and oxidation in bottom sediments of background areas of the different basins are quasi-stationary, not influenced by inter-annual variability in water inflow and, consequently, the water level of Lake Baikal (e.g., 2017 – low water year; 2021, 2023 – extremely high water years).

At sediment depths > 1 m the highest dissolved methane concentrations were observed in the Middle basin, slightly lower values in the Southern and an order of magnitude lower values in the Northern basin, which can be explained by the content of buried organic matter. For example, total organic carbon contents in sediments of Southern and Middle Baikal is estimated at 1.5–2.5%, while in the Northern basin it is noticeably lower – 0.5–1.5% (Vykhristyuk, 1980). An increase in dissolved methane content with increasing total organic carbon in Lake Baikal sediments is also shown in (Gar'kusha et al., 2019).

At the upper part of the cores (0-10(20) cm), the highest dissolved methane concentrations were similarly observed in the Middle and Southern basins, while in Northern Baikal they were significantly lower and practically did not change with sediment depth, remaining at the level of near-surface layers (Fig. 2). This distribution is likely related to the thickness of the oxidized layer, which has small values in Middle and Southern Baikal (on average 3.5 and 5.5 cm respectively), while in Northern Baikal the average oxidized layer thickness increases to 16 cm (Vologina et al., 2003). Such differences in oxidized layer thickness between basins are due to the depth of oxygen penetration into the sediments, confirmed by direct mea-

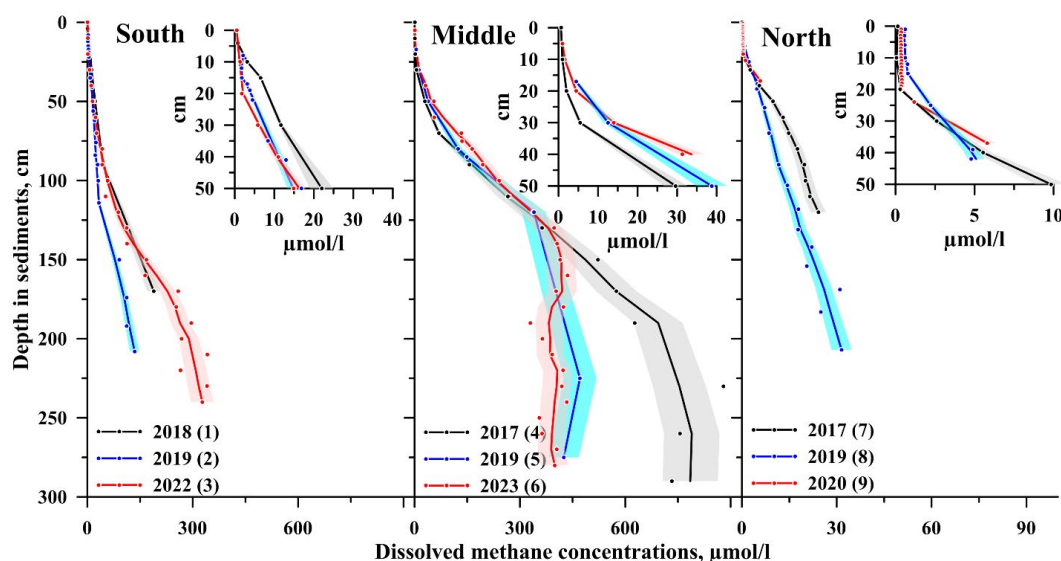


Fig.2. Vertical distribution of methane concentration in bottom sediments of the Southern, Middle, and Northern basins of Lake Baikal. Insets show an enlarged 0.5-meter upper sediment layer. Lines indicate average values. Shaded areas represent the 10% measurement uncertainty.

surements of oxygen concentration profiles in bottom sediments using microelectrodes (Martin et al., 1998; Och et al., 2012).

In general, the methane contents found in bottom sediments of background areas of Baikal are close to those observed in freshwater systems with low to moderate productivity (Table 2). Methane content in Lake Baikal bottom sediments, both according to our measurements and data from other researchers, varies widely – from 0.1 to 1381 μM (Gar'kusha et al., 2019; Fedorov et al., 2005); the high values of the latter are due to sampling in areas with enhanced sedimentation rates and high terrigenous input (near the mouths of Upper Angara and Selenga rivers, etc.). At the same time, these values are much lower than those noted in places of various geological structures with discharge of gas-bearing mineralized fluids, for example, in the area of the mud volcano Malenky methane concentrations reached 9000 μM (Zemskaya et al., 2008, Zemskaya et al., 2010).

It is important to note that, despite the wide range of methane content within the sediments of studied background areas, in the near-surface layers methane concentrations do not exceed 1-2 μM (Fig. 2). It is also known that in the near-bottom waters of this areas, the concentration of dissolved methane is lower by additional 2-3 orders of magnitude (Mizandrontsev et al., 2020). This difference suggests near complete oxidation of methane supplied from deep layers of bottom sediments in background areas of Lake Baikal, and, accordingly, minimal influence of the methane diffusion flux on its content in near-bottom waters.

Compared to oceanic sediments, whose upper horizons are controlled by sulfate reduction (Bernard, 1979), Baikal sediments exhibit different oxidant relationships: in the lake, due to low concentrations of SO_4^{2-} and NO_3^- , the aerobic oxidation zone is much earlier

replaced by the methanogenesis zone (Namsaraev and Zemskaya, 2000; Aloisi et al., 2019). This determines the characteristic linear profiles of methane increase with depth, confirmed by theoretical calculations (Bazhin, 2003), and later by field measurements in the area of continuous sedimentation on the Academician Ridge (Zemskaya et al., 2008). In the cores we studied, methane concentration profiles also exhibit a close-to-linear increase. In contrast, in marine deep-water background sediments, the upper layers are saturated with sulfates and methanogenesis begins to develop in much deeper layers (Bernard, 1979), therefore dissolved methane concentrations in them are lower than in Lake Baikal sediments.

Finally, it is also worth noting a significant increase in the scatter of measured methane concentrations in each core with depth and, accordingly, with increasing its content (Fig. 2). This is because when the core is retrieved, pressure is released, and zones with high methane content begin to degas and lose part of the dissolved methane, leading to an underestimation of its concentration. The rate of degassing, in turn, depends on sediment lithology: it is high in sands and much lower in clayey deposits. Additional mechanical disturbances to the sediment during sampling only accelerate the process in layers where the concentration is many times higher than the equilibrium with the atmosphere, resulting in greater scatter in the measured values. Therefore, when working with high methane concentrations in sediments, it is advisable to use pressure-conserving coring techniques.

5. Conclusions

As a result of this study, data on the detailed vertical distribution of dissolved methane in bottom sedi-

Table 2. Methane content in bottom sediments of some lakes.

Lake	Rang of methane content in bottom sediments	Reference
Ladoga	1 - 3864 μM	Fedorov et al., 2005
Onega	3.12 – 535 μM	Vedishcheva, 2020
Valday	2 - 4818 μM	Fedorov et al., 2005
Uzhin	163.4 - 468 μM	Fedorov et al., 2005
Tambukan (Pyatigorsk)	1 - 180 μM	Fedorov et al., 2005
Chertovo (Sea of Azov)	2 - 198 μM	Fedorov et al., 2005
Glubokoe	1 - 55.6 μM	Fedorov et al., 2005
Tundra lakes	0.01 - 113 μM	Fedorov et al., 2005
Mendota, USA	1 - 153 μM	Fedorov et al., 2005
Michigan, USA	1 - 9.6 μM	Fedorov et al., 2005
Erie	0.4 - 3658 μM	Adams and Fendinger, 1986
Biwa	40 - 2410 μM	Murase and Sugimoto, 2001
Fryxell	1100 μM	Smith et al., 1993
Loosdrecht	100 - 1500 μM	Sinke et al., 1992
Antarctic freshwater	1.7 – 630 μM	Ellis-Evans, 1984
Geneva	100 – 1100 μM	Sollberger et al., 2014

ments of background areas of the three basins of Lake Baikal have been obtained and summarized for the first time. The vertical distributions are characterized by low methane concentrations in the near-surface sediment layers and a pronounced close-to-linear increase with subbottom depth, reaching quasi-homogeneous values at about 1.5–2.0 m depths. This profile shape reflects the specifics of Baikal sediments, where the aerobic oxidation zone, due to low sulfate and nitrate content, is rapidly replaced by the zone of methanogenesis. This fundamentally distinguishes the bottom sediments of Lake Baikal from background marine sediments. Comparison with other lakes shows that the range of methane concentrations in sediments of background areas of Lake Baikal corresponds to the range typical for freshwater systems with low to moderate productivity.

Significant differences in methane concentrations between the lake basins have been identified: maximum values are characteristic of the Middle basin (up to 880 μM), somewhat lower for the Southern basin (up to 350 μM), and an order of magnitude lower for the Northern basin (up to 32 μM). Despite the significant range in methane concentrations within the sediment column of different basins, in upper part of cores (0–10(20) cm) its content does not exceed 1–2 μM , indicating significant oxidation of methane supplied from deeper horizons and consistent with 2–3 orders of magnitude lower concentrations of dissolved methane in the near-bottom waters of Lake Baikal.

Good reproducibility of methane concentration profiles, obtained in the same areas in different years, both in shape and absolute values, indicates a quasi-stationary nature of the methane generation and oxidation processes in bottom sediments of background areas of Lake Baikal, not affected by interannual variability in lake level.

In the near future, it is planned to conduct more detailed studies of the vertical distribution of dissolved methane concentrations on a broad network of stations across Lake Baikal to assess intra-basin heterogeneities in its content.

Acknowledgements

Sampling for gas chromatographic analysis was conducted from the R/V “G.Yu. Vereshchagin” (The Center for Collective Use «Research vessels Center of LIN SB RAS on Lake Baikal»). The work was carried out within the framework of State Assignments of LIN SB RAS No. 0279-2021-0006 and 0279-2021-0004. The authors express gratitude to T.I. Zemskaya for organizing expedition work and comprehensive support of the research, T.V. Pogodaeva, and A.P. Fedotov for critical and useful discussion of the results, and M.M. Makarov for assistance in preparing cartographic material.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Adams D.D., Fendinger N.J. 1986. Early Diagenesis of Organic Matter in the Recent Sediments of Lake Erie and Hamilton Harbor. In: Sly P.G. (Ed.), *Sediments and Water Interactions*. New York: Springer, pp. 305–318. DOI: [10.1007/978-1-4612-4932-0_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4932-0_25)
- Aloisi G., Pogodaeva T.V., Poort J. et al. 2019. Biogeochemical processes at the Krasnyi Yar seepage area (Lake Baikal) and a comparison with oceanic seeps. *Geo-Marine Letters* 39: 59–75.
- Bazhin N.M. 2003. Methane emission from the active layer. In: Conference “Gas Hydrates in the Earth’s Ecosystem”, pp. 19. (in Russian)
- Bernard B.B. 1979. Methane in marine sediments. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 26(4): 429–443. DOI: [10.1016/0198-0149\(79\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0198-0149(79)90056-6)
- Bolshakov A.M., Egorov A.V. 1987. On the use of the phase-equilibrium degassing technique in gasometric studies. *Oceanology* 27: 861–862. (in Russian)
- Efremova A.G., Gritchina N.D. 1981. Gas hydrates in marine sediments and the problem of their practical use. *Geology of Oil and Gas* 2: 32–35. (in Russian)
- Egorov A.V. 2002. Formation and decomposition of gas hydrates in sediments of the Arctic submarine mud volcano Haakon Mosby. *Experience of System Studies in the Arctic*. Moscow: Nauchny Mir, pp. 511–521.
- Egorov A.V., Zemskaya T.I., Grachev M.A. 2005. First data on patterns of methane distribution in water and sediments of Lake Baikal. In: *The Fourth Vereshchagin Baikal Conference*, pp. 77–78. (in Russian)
- Egorov A.V., Zemskaya T.I., Grachev M.A. 2003. First data on patterns of vertical methane distribution in the water column of Lake Baikal. In: *The XV International School on Marine Geology*, pp. 169–170. (in Russian)
- Ellis-Evans J.C. 1984. Methane in maritime Antarctic freshwater lakes. *Polar Biology* 3: 63–71. DOI: [10.1007/BF00258149](https://doi.org/10.1007/BF00258149)
- Fedorov Yu.A., Tambieva N.S., Gar’kusha D.N. et al. 2005. Methane in aquatic ecosystems. Rostov-on-Don: ZAO “Rostizdat”. (in Russian)
- Gar’kusha D.N., Fedorov Yu.A., Tambieva N.S. et al. 2019. Methane in water and bottom sediments of Lake Baikal. *Water Resources* 46(5): 511–522. (in Russian)
- Isaev V.P., Konovalova N.G., Mikheev P.V. 2002. Natural gases of Baikal. *Geology and Geophysics* 43(7): 638–643. (in Russian)
- Isaev V.P., Mikheev P.V. 2001. Gas clathrate hydrates of Lake Baikal. In: *The IV Regional Scientific-Practical Conference “Intellectual and Material Resources of Siberia*, pp. 213–223. (in Russian)
- Kalmychikov G.V., Egorov A.V., Kuzmin M.I. et al. 2006. Genetic types of methane in Lake Baikal. *Doklady Akademii Nauk* 411(5): 672–675. (in Russian)
- Lebed’ G.G. 1984. Report on the results of regional, area-wide and experimental-methodological geochemical works for 1981–1983. (in Russian)
- Levi K.G., Arzhannikova A.V., Buddo V.Yu. et al. 1997. Modern geodynamics of the Baikal Rift. *Razvedka i Okhrana Nedr* 1: 10–20. (in Russian)
- Martin P., Granina L., Martens K. et al. 1998. Oxygen concentration profiles in sediments of two ancient lakes: Lake Baikal (Siberia, Russia) and Lake Malawi (East Africa). *Hydrobiologia* 367: 163–174. DOI: [10.1023/A:1003280101128](https://doi.org/10.1023/A:1003280101128)
- Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandel’baum M.M. et al. 2001. *Cenozoic of the Baikal Rift Basin: Structure and Geological History*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)

- Mizandrontsev I.B., Kozlov V.V., Ivanov V.G. et al. 2020. Vertical distribution of methane in the water column of Baikal. *Water Resources* 47(1): 78–85. DOI: [10.31857/S0321059620010101](https://doi.org/10.31857/S0321059620010101) (in Russian)
- Murase J., Sugimoto A. 2001. Spatial distribution of methane in the Lake Biwa sediments and its carbon isotopic compositions. *Geochemical journal* 35(4): 257–263. DOI: [10.2343/geochemj.35.257](https://doi.org/10.2343/geochemj.35.257)
- Namsaraev B.B., Zemskaya T.I. 2000. Microbiological processes of carbon cycling in bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Och L., Müller B., Voegelin A. et al. 2012. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments. *Chemical Geology* 330-331: 244–259. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.011)
- Sinke A.J.C., Cornelese A.A., Cappenberg T.E. et al. 1992. Seasonal variation in sulfate reduction and methanogenesis in peaty sediments of eutrophic Lake Loosdrecht. The Netherlands. *Biogeochemistry* 16: 43–61. DOI: [10.1007/BF00024252](https://doi.org/10.1007/BF00024252)
- Smith R.L., Miller L.G., Howes B.L. 1993. The geochemistry of methane in Lake Fryxell, an amictic, permanently ice-covered, antarctic lake. *Biogeochemistry* 21: 95–115. DOI: [10.1007/BF00000873](https://doi.org/10.1007/BF00000873)
- Sollberger S., Corella J.P., Girardclos S. et al. 2014. Spatial heterogeneity of benthic methane dynamics in the subaquatic canyons of the Rhone River Delta (Lake Geneva). *Aquatic Science* 76(1): 89–101. DOI: [10.1007/s00027-013-0319-2](https://doi.org/10.1007/s00027-013-0319-2)
- Vedishcheva O.N. 2020. Characteristics of organic matter and gases in bottom sediments of Lake Onega. In: “Proceedings of the International Youth Scientific Forum ‘LOMONOSOV-2020’”. Electronic resource. (in Russian)
- Vologina E.G., Sturm M., Vorob’eva S.S. et al. 2003. Character of sedimentation in lake Baikal in the Holocene. *Geology and Geophysics* 44(5): 407–421. (in Russian)
- Vykhristyuk L.A. 1980. Organic matter in bottom sediments of Baikal. *Proceedings of the Limnological Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences* 32: 80. (in Russian)
- Zemskaya T.I., Khlystov O.M., Egorov A.V. et al. 2008. Complex studies of gas hydrate manifestations in Lake Baikal sediments. *Environmental and Climate Change* 4: 125–152. (in Russian)
- Zemskaya T.I., Pogodaeva T.V., Shubenkova O.V. et al. 2010. Geochemical and microbiological characteristics of sediments near the Malenky Mud Volcano (Lake Baikal, Russia), with evidence of archaea intermediate between the marine anaerobic methanotrophs ANME-2 and ANME-3. *Geo-Marine Letters* 30: 411–425. DOI: [10.1007/s00367-010-0199-6](https://doi.org/10.1007/s00367-010-0199-6)

Вертикальное распределение концентрации растворенного метана в осадках фоновых районов озера Байкал

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Иванов В.Г.^{ORCID}, Хабуев А.В.^{ORCID}

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые получены и обобщены вертикальные распределения концентраций растворённого метана в донных отложениях фоновых районов южной, средней и северной котловин озера Байкал вплоть до 3-х метровых глубин осадочного чехла. Вертикальные профили содержания метана на всех станциях имеют сходные черты и характеризуются низкими концентрациями в приповерхностных слоях (не превышающими 1–2 мкМ) и устойчивым ростом содержания метана с глубиной. Максимальные концентрации метана в толще осадка отмечены в средней котловине, несколько меньшие — в южной и на порядок меньшие — в северной котловине. Экспоненциальное снижение концентрации метана в отложениях при приближении к границе дно–вода к одинаково малым значениям независимо от его содержания в толще осадка свидетельствует о его существенном окислении и, как следствие, минимальном влиянии на концентрации метана в придонной воде. Полученные результаты восполняют пробел в знаниях о вертикальном распределении растворённого метана в осадках озера Байкал, и важны для оценки устойчивости углеводородных систем и механизмов их функционирования в условиях холодноводного глубоководного пресноводного водоёма.

Ключевые слова: концентрация метана, донные отложения, метод парофазного равновесия, Байкал

Для цитирования: Иванов В.Г., Хабуев А.В. Вертикальное распределение концентрации растворенного метана в осадках фоновых районов озера Байкал // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 6. - С. 1390-1401. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-6-1390

1. Введение

В связи с глобальным изменением климата изучение содержания и распределения парниковых газов в Мировом океане и внутриконтинентальных водоемах представляет научный и практический интерес. В конце прошлого века большое внимание стало уделяться изучению закономерностей распределения метана в различных водных экосистемах в связи со значительной его ролью в атмосферных химических реакциях и, в частности, в процессах разрушения озонового слоя (Бажин, 2003). Изучение условий образования и закономерностей распределения метана в донных отложениях водоемов различного типа также традиционно используется в качестве поискового критерия нефтегазонасыщенности акваторий. В последнее время интерес к этому газу усилился и в связи с подтверждением возможности использования концентрации раство-

ренного метана для оценки уровня загрязненности водоемов.

Газы донных отложений озера Байкал изучались в разные временные периоды (Ефремова и Гритчина, 1981; Лебедь, 1984; Исаев и Михеев, 2001). Первые детальные исследования проводились сотрудниками ВНИИгаз А.Г. Ефремовой и М.В. Андреевой при участии сотрудников ЛИИ СО РАН в 1978 г. В 80-х годах выполнен большой объем геохимических работ в районе Селенгинского мелководья под руководством Г.Г. Лебеда, в ходе которых установлена высокая газонасыщенность верхнего слоя осадков метаном (до 10–25 см³/кг), особенно в заливе Провал. Авторы отметили прямую зависимость между концентрациями водорода и метана и невысокие концентрации тяжелых углеводородных (УВ) газов. Более поздние исследования (Исаев и др., 2002) показали присутствие в донных осадках азотных и метановых типов газа, а также их проме-

*Автор для переписки. Адрес e-mail: vigo@lin.irk.ru (В.Г. Иванов)

Поступила: 24 ноября 2025;

Принята после доработки: 19 декабря 2025;

Опубликована online: 25 декабря 2025

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



жуточных типов. Из тяжелых УВ отмечено присутствие этана, пропана, этилена и пропилена (Исаев и др., 2002). Концентрация метана в придонных водах Байкала, так же, как и в придонных водах Мирового океана, очень мала (порядка 10-40 нл/л) (Егоров, 2002; Егоров и др., 2003; Егоров и др., 2005, Мизандронцев и др., 2020).

Вертикальное распределение метана в донных осадках Байкала представляет особый интерес в связи с большой глубиной озера, в результате чего условия осадконакопления приближаются к морским. Несмотря на это, существующие сведения о закономерностях его вертикального распределения в донных отложениях разных котловин озера весьма ограничены, т.к. исторически основное внимание уделялось исследованию распределения и генезиса метана в зонах разгрузки газосодержащих флюидов и в различных типах геологических структур, где обнаруживались газовые гидраты (Калмычков и др., 2006). Для районов непрерывного осадконакопления Байкала в литературе описано лишь поддонное распределение метана на Академическом хребте (Земская и др., 2008). Другие исследования были ограничены измерением содержания метана только в небольших приповерхностных слоях осадка (Гарькуша и др., 2019; Och et al., 2012).

Таким образом, целью настоящей работы являлось измерение и анализ вертикального распределения концентрации растворенного метана в донных отложениях фоновых районов трёх котловин озера Байкал и сравнение полученных результатов с данными по другим водным объектам.

2. Материалы и методы

Районы исследования

Морфологически внутри Байкальской впадины отчетливо выделяются три котловины это южная, средняя и северная (Рис. 1). Южный и Средний Байкал выделяются как самостоятельные глубоководные образования, разделенные Бугульдейской перемычкой. Северный Байкал отличается меньшими глубинами и рядом особенностей геологического строения фундамента. Он отделен от Среднего Байкала межвпадинной перемычкой, включающей наземный и подводный фрагменты

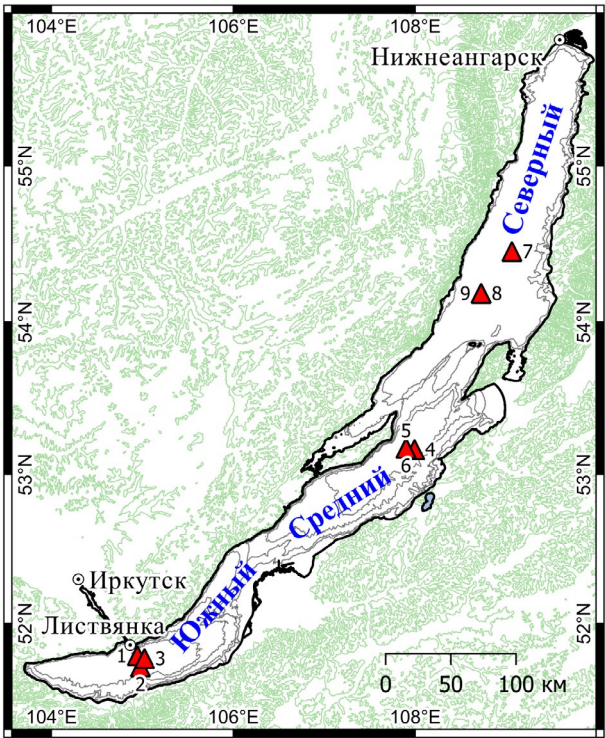


Рис.1. Схема расположения отбора проб, подробная расшифровка номеров станций приведена в Таблице 1.

(Мац и др., 2001). Они, в свою очередь, неоднородны по внутренней структуре и состоят из более мелких депрессий, отличающихся по своему тектоническому развитию и осадконакоплению (Леви и др., 1997).

К фоновым районам озера Байкал можно отнести участки дна с непрерывным осадконакоплением, ненарушенным тектонической активностью или флюидной разгрузкой, т.е. не происходит смещение или переотложение донных отложений. К таким районам относятся выровненные участки в центральных частях котловин или на межвпадинных перемычках. Для первых наличие турбидитов является аномалией в непрерывности условий осадконакопления, что следует учитывать при анализе результатов.

Методы отбора и анализа

Отбор проб для измерения концентрации метана в осадках трех котловин проводился в июне-июле с 2017 по 2023 гг. (Рис. 1, Таблица 1).

Таблица 1. Даты, координаты и глубины отбора проб на станциях в трех котловинах озера Байкал.

N	Дата отбора	Широта, град	Долгота, град	Котловина	Станция	Глубина, м
1	12.07.2018	51,779882	104,945453	южная	7 км Листвянка	1400
2	20.07.2019	51,702595	104,978775		Листвянка-Танхой	1400
3	16.06.2022	51,76009	105,024683		9 км Листвянка	1400
4	30.06.2017	53,165472	107,993900	средняя	Ижимей	1610
5	13.07.2019	53,17378	107,900228		Ижимей	1610
6	09.07.2023	53,173768	107,900068		Ижимей	1610
7	02.07.2017	54,455308	109,064938	северная	Елохин-Давша	900
8	16.07.2019	54,186112	108,72612		Заворотный	900
9	16.07.2020	54,186112	108,72612		Заворотный	900

Отбор проб грунта осуществлялся прямым геологическим опробованием с помощью пробоотборника гравитационного типа с наружным диаметром 127 мм с борта научно-исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин». Внутри пробоотборника вставляется пластиковый вкладыш с внутренним диаметром 110 мм, в который отбираются донные отложения. После подъема на борт судна вкладыш разрезался и получался непрерывный геологический разрез донных отложений длиной до 3,5 метров.

Отбор образцов производился обрезанным 3 мл шприцем. Содержание метана определялось с использованием метода фазово-равновесной дегазации (Большаков и Егоров, 1987), для чего отобранный образец осадка объемом 2 мл помещался в стеклянный пузырек объемом 33 мл, заполненный 20 мл дистиллированной водой. Пузырек закрывался алюминиевой крышкой с резиновой пробкой, переворачивался и подвергался механической тряске с целью дезинтеграции осадка и его максимальной дегазации в течение 30 минут.

Для хроматографического анализа аликвота газа отбиралась шприцом через отверстие в крышке. Анализ проводился на газовом хроматографе «ЭХО–EW–ПИД» (Россия) с пламенно-ионизационным детектором непосредственно на борту судна. Калибровка хроматографа производилась по стандарту «Азот» ($N_2 + 1000 \text{ ppm } CH_4$) фирмы ООО «ПГС-Сервис» (г. Заречный). Относительная ошибка определения концентрации метана в пробе газа составляет $\pm 5\%$, суммарная ошибка, с учетом возможной частичной дегазации осадка при разделке керна принята равной $\pm 10\%$.

3. Результаты

Измеренные концентрации метана в донных отложениях разных котловин приведены на Рис. 2. Величины концентраций метана в разных кернах

варьировали в широком диапазоне, от долей до сотен мкмоль/л. Профили содержания метана во всех котловинах озера показывают существенный рост с глубиной. В Южном и Среднем Байкале насыщение концентраций достигалось в районе 300-700 мкмоль/л на горизонтах крена более 1,2-2,0 метров, глубже концентрации изменялись вокруг достигнутых значений до самых нижних вскрытых горизонтов. Наибольшие концентрации метана достигались в приповерхностных донных отложениях средней котловины, чуть меньшие - в южной, и на порядок ниже в северной котловине озера.

У поверхности дна концентрации во всех котловинах не превышали 1-2 мкмоль/л, с выделением участков с однородной концентрацией метана на станциях северной котловины. При приближении к поверхности осадка преобладал экспоненциальный спад концентраций. В то время как на глубинах осадка более 25-50 см увеличение концентраций с глубиной становилось близко к линейному (Рис. 2).

4. Обсуждение

Полученные в результате исследования профили растворенного метана в осадках озера Байкал показывают типичное для его фоновых районов вертикальное распределение: низкие концентрации метана в верхних сантиметрах осадка, выровненные по вертикали или с экспоненциальным уменьшением при приближении к границе с водой. И выраженное, преимущественно линейное увеличение концентрации с глубиной, достигающее квазиоднородных значений на отдельных станциях (3, 4, 5, 6) на глубинах 1,5–2,0 м. (Рис. 2). Профиль на станции 2, при этом, имеет заметный перегиб на поддонной глубине 1,2 м, после которого скорость нарастания концентрации метана возрастает. Похожий перегиб наблюдался и в осадках на Академическом хребте, только на глубине 2,4 метра (Земская и др., 2008).

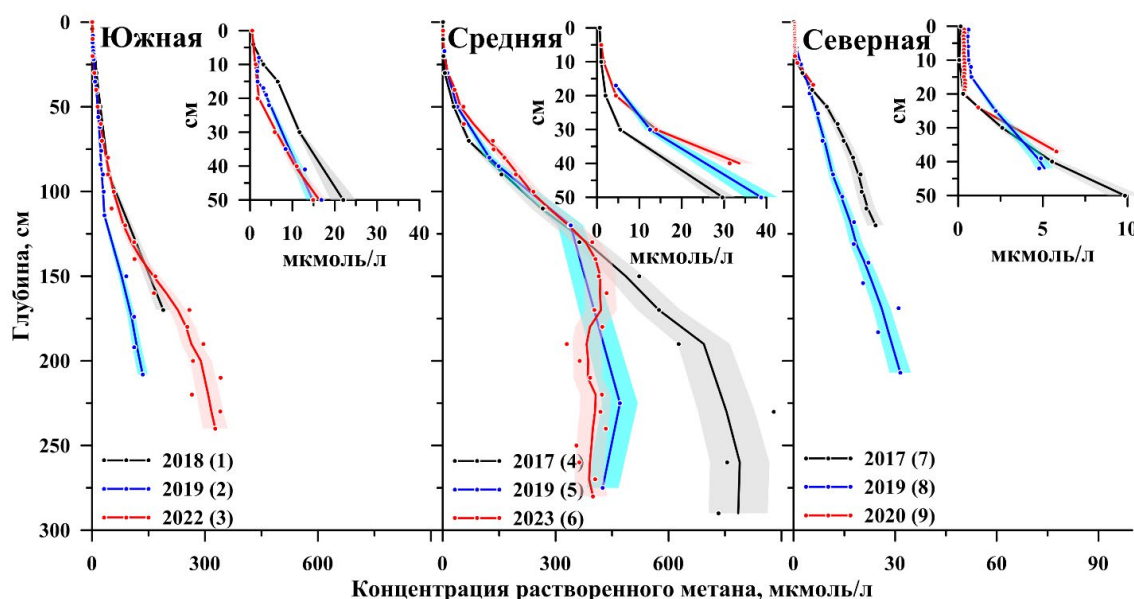


Рис.2. Вертикальное распределение концентрации метана в донных отложениях южной, средней и северной котловин озера Байкал. На врезках показан увеличенный 0.5 метровый верхний слой осадков. Линиями приведены усредненные значения. Закрашенными областями отображена 10% ошибка измерений.

Следует отметить, что профили концентрации метана, полученные в одном и том же районе в разные годы, достаточно хорошо совпадают как по характеру изменений, так и по абсолютным значениям (пары профилей 1, 3; 5, 6 и 7, 9 на Рис. 2). Учитывая 3-4 летние временные промежутки между станциями можно сделать вывод о квазистационарном характере процессов генерации и окисления метана в донных отложениях фоновых районов котловин, на которых не отразилось влияние межгодовой изменчивости водности, и как следствие, уровня озера Байкал (например, 2017 – маловодный; 2021, 2023 – экстремально многоводные годы).

На глубинах осадочного чехла более метра наибольшие концентрации растворенного метана наблюдались в средней котловине, чуть меньшие — в южной и на порядок меньшие — в северной котловине, что может объясняться содержанием захороненного органического вещества. Например, содержания общего органического углерода, в осадках Южного и Среднего Байкала составляют 1,5–2,5%, в то время как в северной котловине заметно меньше – 0,5–1,5% (Выхристюк, 1980). Увеличение содержания растворенного метана с ростом органического вещества в осадках озера Байкал также показано в работе (Гарькуша и др., 2019).

На первых интервалах в разрезе керна (0-10(20) см) наибольшие концентрации растворенного метана аналогично наблюдались в средней и южной котловинах, в то время как в Северном Байкале они были значительно ниже, и практически не изменялись по глубине, оставаясь на уровне приповерхностных слоёв (Рис. 2). Такое распределение вероятно тесно связано с мощностью окисленного слоя, который имеет небольшие величины в Среднем и Южном Байкале (в среднем 3,5 и 5,5 см соответственно), в то время как в Северном Байкале

средняя величина окисленного слоя возрастает до 16 см (Вологина и др., 2003). Такие различия в мощности окисленного слоя между котловинами обусловлены глубиной проникновения кислорода в осадки, что подтверждается непосредственными измерениями в донных отложениях профилей концентрации кислорода с помощью микроэлектродов (Martin et al., 1998; Och et al., 2012).

В целом, обнаруженные содержания метана в донных осадках фоновых районов Байкала близки к наблюдаемым в пресноводных системах с низкой и умеренной продуктивностью (Таблица 2). Содержание метана в донных отложениях озера Байкал, как по нашим измерениям, так и данным других исследователей изменяется в широких пределах - от 0,1 до 1381 мкМ (Гарькуша и др., 2019; Федоров и др., 2005), высокие значения в последних обеспечено за счет отбора проб в районах с высоким осадконакоплением и большим содержанием терригенного материала (в местах впадения Верхней Ангары, Селенги и т.п.). Эти значения гораздо ниже отмечаемых в районах различных геологических структур и разгрузки газосодержащих минерализованных флюидов, например, в районе грязевого вулкана Маленький концентрации метана достигали 9000 мкМ (Земская и др., 2008, Zemskaya et al., 2010).

Важно отметить, что, несмотря на существенный разброс содержания метана в толще осадка разных котловин, в приповерхностных слоях исследованных нами фоновых районов концентрации метана не превышают 1-2 мкМ (Рис. 2). Также известно, что в придонных слоях фоновых районов концентрация растворенного метана в воде ниже этих значений еще на 2-3 порядка (Мизандронцев и др., 2020). Такое различие позволяет говорить о практически полном окислении поступающего

Таблица 2. Содержание метана в донных отложениях некоторых озёр

Озеро	Пределы изменения содержания метана в донных осадках	Литературный источник
Ладожское	1 - 3864 мкМ	Федоров и др., 2005
Онежское	3,12 – 535 мкМ	Ведищева, 2020
Валдай	2 - 4818 мкМ	Федоров и др., 2005
Ужин	163,4 - 468 мкМ	Федоров и др., 2005
Тамбукан (г. Пятигорск)	1 - 180 мкМ	Федоров и др., 2005
Чёртово (Азовское море)	2 - 198 мкМ	Федоров и др., 2005
Глубокое	1 - 55,6 мкМ	Федоров и др., 2005
Тундровые озёра	0,01 - 113 мкМ	Федоров и др., 2005
Мендота, США	1 - 153 мкМ	Федоров и др., 2005
Мичиган, США	1 - 9,6 мкМ	Федоров и др., 2005
Эри	0,4 - 3658 мкМ	Adams and Fendinger, 1986
Бива	40 - 2410 мкМ	Murase and Sugimoto, 2001
Фрайксел	1100 мкМ	Smith et al., 1993
Лусдрехт	100 - 1500 мкМ	Sinke et al., 1992
Антарктические пресноводные	1,7 – 630 мкМ	Ellis-Evans, 1984
Женева	100 – 1100 мкМ	Sollberger et al., 2014

метана из глубоких слоев донных отложений фоновых районов озера Байкал, и, соответственно, минимальном влиянии диффузионного потока метана на его содержание в придонной воде.

По сравнению с фоновыми океаническими осадками, верхние горизонты которых контролируются сульфатредукцией (Bernard, 1979), байкальские осадки проявляют иные соотношения окислителей: в озере, из-за низких концентраций SO_4^{2-} и NO_3^- , зона аэробного окисления обычно гораздо раньше сменяется зоной метаногенеза (Намсараев и Земская, 2000; Aloisi et al., 2019). Это задаёт характерные линейные профили нарастания метана с глубиной, что было подтверждено теоретическими расчетами (Бажин, 2003), а позднее натурными измерениями в районе постоянного осадконакопления Академического хребта (Земская и др., 2008). В исследованных нами кернах профили концентрации метана также имеют близкий к линейному рост концентраций. В морских глубоководных фоновых осадках напротив, верхние слои насыщены сульфатами и метаногенез начинает развиваться в гораздо более глубоких слоях (Bernard, 1979), поэтому концентрации растворённого метана в них ниже, чем в осадках озера Байкал.

В заключении стоит также отметить значительное увеличение разброса измеренных концентраций метана в каждом из кернов по мере углубления и, соответственно, роста его концентрации (Рис. 2). Это связано с тем, что при подъеме керна, сбрасывается давление, и зоны с высоким его содержанием начинают дегазировать и теряют часть растворённого метана, что приводит к занижению оценок его концентрации. Скорость дегазации, при этом, зависит от литологии осадков, она высока в песках и гораздо меньше в глинистых отложениях. Дополнительные механические воздействия на осадок во время отбора проб только ускоряют процесс в слоях, где концентрация оказывается кратно выше равновесной с атмосферой, приводя к большему разбросу измеренных значений. Поэтому, при работе с высокими концентрациями метана в осадках целесообразно использовать методы пробоотбора с сохранением внутрипластового давления.

5. Выводы

В результате выполненного исследования впервые получены и обобщены сведения о подробном вертикальном распределении растворенного метана в донных отложениях фоновых районов трёх котловин озера Байкал. Установлено, что вертикальное распределение характеризуется низкими концентрациями в приповерхностных слоях осадка и выраженным ростом с глубиной, часто близким к линейному, с выходом на квазиоднородные значения на поддонных глубинах порядка 1,5–2,0 м. Такая форма профилей отражает специфику байкальских осадков, где зона аэробного окисления вследствие низкого содержания сульфатов и нитратов довольно быстро сменяется зоной метаногенеза, что принципиально отличает донные отложе-

ния озера Байкал от таковых в морях. Сравнение с другими озёрами показывает, что охват регистрируемых концентраций метана в фоновых отложениях Байкала соответствует диапазону, характерному для пресноводных систем с низкой и умеренной продуктивностью.

Выявлены значимые различия в концентрациях метана между котловинами озера: максимальные значения характерны для средней котловины (до 880 мкМ), несколько меньшие — для южной (до 350 мкМ) и на порядок меньшие — для северной (до 32 мкМ). Несмотря на значительный разброс концентраций метана в толще осадков разных котловин, в приповерхностных слоях (0-10(20) см) его содержание не превышает 1–2 мкМ, что указывает на существенное окисление метана, поступающего из более глубоких горизонтов, и согласуется с на 2-3 порядка меньшими концентрациями растворённого метана в придонных водах озера Байкал.

Хорошая воспроизводимость профилей концентрации метана, полученных в одних и тех же районах в разные годы, как по форме, так и по абсолютным значениям, свидетельствует о квазистационарном характере процессов генерации и окисления метана в донных отложениях фоновых районов озера Байкал, на которых не сказывается межгодовая изменчивость уровня озера.

В дальнейшем планируется провести более подробные исследования вертикального распределения концентрации растворенного метана на широкой сетке станций по всему озеру Байкал, для оценки внутрикотловинных неоднородностей его содержания.

Благодарности

Отбор образцов для газохроматографического анализа проводился с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала»). Работа выполнена в рамках Государственных заданий ЛИН СО РАН № 0279-2021-0006 и 0279-2021-0004. Авторы выражают благодарность Земской Т.И. за организацию экспедиционных работ и всестороннюю поддержку исследования, Погодаевой Т.В. и Федотову А.П. за критическое и полезное обсуждение результатов, Макарову М.М. за помощь в оформлении картографического материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Бажин Н.М. 2003. Эмиссия метана из активного слоя. В: Тезисы конференции «Газовые гидраты в экосистеме Земли». Новосибирск, С. 19.
- Большаков А.М., Егоров А.В. 1987. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях. Океанология 27: 861–862.

- Ведищева О.Н. 2020. Характеристика органического вещества и газов донных осадков Онежского озера. «Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020»». Второе издание: переработанное и дополненное. В: Алешковский И.А., Андриянов А.В., Антипов Е.А. (ред.). Москва: МАКС Пресс. (Электронный ресурс)
- Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С. и др. 2003. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене. *Геология и геофизика* 44(5): 407–421.
- Выхристюк Л.А. 1980. Органическое вещество донных осадков Байкала. *Труды ЛИН СО АН СССР* 32: 80.
- Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. и др. 2019. Метан в воде и донных отложениях озера Байкал. *Водные ресурсы* 46(5): 511–522.
- Егоров А.В. 2002. Формирование и разложение газовых гидратов в осадках арктического подводного грязевого вулкана Хаакон Мосби. Опыт системных исследований в Арктике, С. 511–521.
- Егоров А.В., Земская Т.И., Грачев М.А. 2005. Первые данные о закономерности распределения метана в воде и осадках оз. Байкал. В: Четвертая Вережцагинская Байкальская конференция, С. 77–78.
- Егоров А.В., Земская Т.И., Грачев М.А. 2003. Первые данные о закономерностях вертикального распределения метана в водной толще оз. Байкал. В: Тезисы докладов XV Международной школы морской геологии. Москва: Научный мир, С. 169–170.
- Ефремова А.Г., Гритчина Н.Д. 1981. Газогидраты в морских осадках и проблема их практического использования. *Геология нефти и газа* 2: 32–35.
- Земская Т.И., Хлыстов О.М., Егоров А.В. и др. 2008. Комплексные исследования проявлений газовых гидратов в осадках озера Байкал. Изменение окружающей среды и климата 4: 125–152.
- Исаев В.П., Коновалова Н.Г., Михеев П.В. 2002. Природные газы Байкала. *Геология и геофизика* 43(7): 638–643.
- Исаев В.П., Михеев П.В. 2001. Газовые кристаллогидраты озера Байкал. В: Материалы IV региональной научно-практической конференции «Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири, С. 213–223.
- Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И. и др. 2006. Генетические типы метана озера Байкал. *Доклады академии наук* 411(5): 672–675.
- Лебедь Г.Г. 1984. Отчет о результатах региональных, площадных и опытно-методических геохимических работ за 1981 – 1983. Иркутск: Востсибнефтегазгеология.
- Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю. и др. 1997. Современная геодинамика Байкальского рифта. *Разведка и охрана недр* 1: 10–20.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. 2001. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г. и др. 2020. Вертикальное распределение метана в водной толще Байкала. *Водные ресурсы* 47(1): 78–85. DOI: [10.31857/S0321059620010101](https://doi.org/10.31857/S0321059620010101)
- Намсараев Б.Б., Земская Т.И. 2000. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН.
- Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. и др. 2005. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: ЗАО «Ростиздат».
- Adams D.D., Fendinger N.J. 1986. Early Diagenesis of Organic Matter in the Recent Sediments of Lake Erie and Hamilton Harbor. In: Sly P.G. (Ed.), *Sediments and Water Interactions*. New York: Springer, pp. 305–318. DOI: [10.1007/978-1-4612-4932-0_25](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4932-0_25)
- Aloisi G., Pogodaeva T.V., Poort J. et al. 2019. Biogeochemical processes at the Krasniy Yar seepage area (Lake Baikal) and a comparison with oceanic seeps. *Geo-Marine Letters* 39: 59–75.
- Bernard B.B. 1979. Methane in marine sediments. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 26(4): 429–443. DOI: [10.1016/0198-0149\(79\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0198-0149(79)90056-6)
- Ellis-Evans J.C. 1984. Methane in maritime Antarctic freshwater lakes. *Polar Biology* 3: 63–71. DOI: [10.1007/BF00258149](https://doi.org/10.1007/BF00258149)
- Martin P., Granina L., Martens K. et al. 1998. Oxygen concentration profiles in sediments of two ancient lakes: Lake Baikal (Siberia, Russia) and Lake Malawi (East Africa). *Hydrobiologia* 367: 163–174. DOI: [10.1023/A:1003280101128](https://doi.org/10.1023/A:1003280101128)
- Murase J., Sugimoto A. 2001. Spatial distribution of methane in the Lake Biwa sediments and its carbon isotopic compositions. *Geochemical journal* 35(4): 257–263. DOI: [10.2343/geochemj.35.257](https://doi.org/10.2343/geochemj.35.257)
- Och L., Müller B., Voegelin A. et al. 2012. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments. *Chemical Geology* 330–331: 244–259. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2012.09.011](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.011)
- Sinke A.J.C., Cornelese A.A., Cappenberg T.E. et al. 1992. Seasonal variation in sulfate reduction and methanogenesis in peaty sediments of eutrophic Lake Loosdrecht. The Netherlands. *Biogeochemistry* 16: 43–61. DOI: [10.1007/BF00024252](https://doi.org/10.1007/BF00024252)
- Smith R.L., Miller L.G., Howes B.L. 1993. The geochemistry of methane in Lake Fryxell, an amictic, permanently ice-covered, antarctic lake. *Biogeochemistry* 21: 95–115. DOI: [10.1007/BF00000873](https://doi.org/10.1007/BF00000873)
- Sollberger S., Corella J.P., Girardclos S. et al. 2014. Spatial heterogeneity of benthic methane dynamics in the subaquatic canyons of the Rhone River Delta (Lake Geneva). *Aquatic Science* 76(1): 89–101. DOI: [10.1007/s00027-013-0319-2](https://doi.org/10.1007/s00027-013-0319-2)
- Zemskaya T.I., Pogodaeva T.V., Shubenkova O.V. et al. 2010. Geochemical and microbiological characteristics of sediments near the Malenky Mud Volcano (Lake Baikal, Russia), with evidence of archaea intermediate between the marine anaerobic methanotrophs ANME-2 and ANME-3. *Geo-Marine Letters* 30: 411–425. DOI: [10.1007/s00367-010-0199-6](https://doi.org/10.1007/s00367-010-0199-6)