

Unification of geological and geophysical characteristics of gas hydrate-bearing structures in Lake Baikal



Khabuev A.V.*^{}, Khlystov O.M.^{}

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

ABSTRACT. We carried out the unification of the geological and geophysical characteristics of the gas hydrate-bearing structures of Lake Baikal. For this purpose, we conducted a comprehensive compilation and analysis of all currently available primary and processed data. The study included a detailed examination of >400 seismic and acoustic profiles, 50 sonograms of side-view sonar, 60 bathymetric schemes of multipath echo sounder, and >1,000 primary descriptions of sediment cores. This resulted in the identification of six reference (model and typical) gas hydrate-bearing structures (two mud volcanoes, two hydrate mounds, and two seeps), which most fully characterize each of the listed types. Unification of characteristics of hydrate-bearing structures of Lake Baikal and allocation of supporting structures facilitates the research of already known ones and will help in the search for new places with near-surface gas hydrates in bottom sediments.

Keywords: unification, mud volcano, seep, hydrate mound

For citation: Khabuev A.V., Khlystov O.M. Unification of geological and geophysical characteristics of gas hydrate-bearing structures in Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 6. - P. 1355-1366. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-6-1355

1. Introduction

Research on gas hydrates in the World Ocean encompasses investigations of mud volcanoes, oil seeps, fault zones, methane emissions, and hydrocarbon reserves. To date, some studies have been conducted to synthesize a significant volume of information on this topic. Such works are primarily presented as catalogues and atlases (e.g., Yakubov et al., 1971; Aliyev et al., 2002; 2015) or as databases of specific measurements or phenomena (e.g., Etiope, 2009; Ershov and Bondarenko, 2020). Matveeva (2024) created a comprehensive database to assess the hydrocarbon resources of gas hydrates in the seas of Russia. Lake Baikal can also be classified as an aquatic area with hydrocarbon potential, a portion of which exists in the form of gas hydrates (Kontorovich et al., 2007). For the Baikal region, several databases exist, including a database of seismic faults (Lunina, 2016), a spatial database of ecosystems (Bazha et al., 2022), and a catalogue of data on regional earthquake epicenters since 1960 (<https://www.seis-bykl.ru/index.php>).

With the discovery of near-surface gas hydrates in Lake Baikal in 2000, geological and geophysical data

were collected throughout the lake in order to study the geology of their accumulations in the upper five-meter layers of bottom sediments. Over the 25 years of studies that were carried out throughout Lake Baikal, a large amount of data has been accumulated on the structure of the surface layer of the lake's sediments and the geology of gas hydrates in different geological settings. Multi-channel seismic surveys, which were conducted in 1989 and 1992, revealed that the sedimentary layer of the southern and central basins reaches a thickness of up to 10 km, and its age is estimated as the Oligocene-Miocene period (Hutchinson et al., 1992; Golmshtok et al., 1997). Numerous faults visible on the seismic profiles, which are a consequence of the high seismicity of the region, indicate the presence of effective migration pathways that allow deep-seated gas-saturated fluids to reach the bottom surface. Under suitable thermobaric conditions, below a certain depth (360-380 m for Lake Baikal), methane can form gas hydrates near the lake bottom (De Batist et al., 2002; Klerkx et al., 2003). Long-term geological, geophysical, and hydrological studies of the lake bottom have led to the discovery of >60 sites with near-surface gas hydrates. Some of these objects were studied in detail in De Batist et al. (2002),

*Corresponding author. E-mail address: shock@lin.irk.ru (A.V. Khabuev)

Received: November 07, 2025;

Accepted after revised: December 15, 2025;

Available online: December 25, 2025

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



Poort et al. (2012), Khabuev et al. (2016), Khlystov et al. (2017; 2019; 2022), Khlystov and Kalmychkov (2020), as well as Khlystov and Khabuev (2024). All the gas hydrate-bearing structures of the lake are divided into four types (mud volcanoes, hydrate mounds, seeps, and one pockmark). Their prospecting geological and geophysical features were substantiated in (Khlystov et al., 2018; Khlystov and Kalmychkov, 2020; Khlystov et al., 2022). The Novosibirsk mud volcano was identified as a reference (model) volcano containing all the features of mud volcanism (Khlystov and Khabuev, 2024).

Currently, combined information on individual structures or types of structures is difficult to find, since there is no single database on the gas hydrate-bearing structures in Lake Baikal, and information about each of them is scattered across different articles, where it is not fully presented. In this study, based on the analysis of all geological and geophysical data and the unification of the characteristics of each type of hydrate-bearing structures, we optimized their classification and identified several reference structures. A local database was created to facilitate work with diverse data on each of the support structures.

2. Materials and methods

Direct geological investigation of bottom sediments was conducted using a straight-flow gravity steel pipe with an outer diameter of 127 mm from the research vessel (R/V) “G.Yu. Vereshchagin” (The Center for Collective Use “Research vessels Center of LIN SB RAS on Lake Baikal”) and from the ice using a mobile winching system towed by “GAZ-66” vehicles. Gravity corers with lengths of 3.5 m and 5 m were employed, each equipped with a core catcher and an upper valve to prevent washout and loss of sediment and gas hydrates during retrieval. A plastic liner was inserted into the pipe to collect the bottom sediments and gas hydrates. Upon retrieval, the liner was extracted, cut longitudinally into two halves, producing a continuous geological section of bottom sediments up to 5 m long. The core was photographed, and a primary lithological description was carried out using the Munsell “Standard Soil Color Chart”. Intervals containing oxidized layers, carbonates, mud volcanic breccia, gas hydrates, and oil were identified. In total, >1000 sediment cores were collected in the gas hydrate-bearing structure areas, of which >360 cores contained gas hydrates.

Prior to core sampling across the lake’s water area, remote sensing of the sedimentary cover of Lake Baikal was conducted using different methods and equipment. Studies of the internal structure of the upper part of the geological section were carried out using continuous seismic profiling methods: the common depth point (CDP) reflection method (multichannel seismic survey), continuous seismic-acoustic profiling (CSAP) (single-channel), and profiling using a profiler. Each method had its own penetration depth into the bottom sediments and resolution. Essentially, they complemented each other in the search and study of gas hydrate-bearing structures. Geophysical surveys using the CDP method were conducted before the dis-

covery of gas hydrates. However, they suggested the presence of gas hydrates in Lake Baikal, and the first near-surface areas for their exploration were identified. Seismic surveys were carried out in 1989 and 1992, covering the eastern part of the southern basin of Lake Baikal, the majority of the central basin, and the southern part of the northern basin. An air gun with a volume of 27.3 liters was used as the signal source. The shot interval was four seconds. The receiver allowed recording from 96 channels with 24 common depth points. This equipment provided data with a vertical resolution of 10 m and a horizontal resolution of up to 300 m, as well as a penetration depth exceeding 3 km. The total length of the 60 profiles amounted to more than 2200 km (1992).

The non-linear signal processing (NSP) method was employed during geophysical exploration surveys between 1999 and 2008. A network of seismic lines covered unevenly most of the Lake Baikal water area. Elastic waves were generated using both the “Ship” and “Impulse-1” air guns, and the “Sparker” electro-spark source. A single-channel streamer was utilized as a receiver. This configuration enabled data acquisition with vertical and horizontal resolutions of 1-3 m and 80-170 m, respectively. Signal penetration into sediments ranged from 400 m (sparker) to 700 m (air gun). More than 200 seismic profiles, with a total length exceeding 3000 km, were analyzed.

The seismoacoustic profiler, which operates within a frequency range of 1 kHz to 8 kHz (typically 6 kHz), is based on the principle of emitting acoustic pulses vertically downward and recording echo signals reflected from the bottom surface and acoustic reflectors within the sub-bottom sedimentary sequence. This profiler could penetrate the bottom sediment section to depths down to 30 m. Over the past 25 years, >1500 line-kilometers of profiles have been acquired, with the majority conducted specifically in areas containing gas hydrate-related structures. Overall, >140 profiles intersecting hydrate-bearing structures have been analyzed.

For detailed investigation of the lake floor morphology and the search for gas hydrate-related features, surveys were carried out using side-scan sonar (SSS), single-beam, and multibeam echosounder. In 2009, the SEABEAM 1050 multibeam echosounder was deployed for the first time in Lake Baikal. This system operated at an acoustic frequency of 50 kHz, with 96 beams and a total swath width of 120°. The achievable horizontal resolution depended on water depth and varied from 5 to 40 m, representing at least a fourfold accuracy compared to previous bathymetric data. This resolution was sufficient for identifying negative and positive anomalies in the bottom relief associated with gas discharge and the accumulation of gas hydrates within sediments. The total length of survey lines amounted to 12,600 line-kilometers, covering an area of >15,000 km².

A single-beam echosounder was employed not only for tracking bottom irregularities and monitoring sampling operations but also for detecting gas seeps in bubble form (“gas flares”) above geological structures. The surveys utilized a Furuno FCV-1100 (Japan)

dual-frequency shipboard echosounder equipped with transducers configured for dual-frequency operation at 28 and 200 kHz, with a pulse duration of 1 ms. The single-beam transducers had beam widths of 21° at 28 kHz and 6° at 200 kHz.

The “SONIK-3” side-scan sonar (SSS) operated at a frequency of 30 kHz and recorded bathymetric anomalies at depths ranging from 5 to 1600 m with an accuracy of 0.5% or more of the depth value. Sonograms generated by the SSS displayed the morphology of the bottom topography, while the backscatter signal allowed for the identification of lithological features within the upper few meters of bottom sediments. Overall, the SSS surveys covered an area of 2,300 km² across the southern and central basins of Lake Baikal.

3. Results

Since the initial discovery of near-surface gas hydrate accumulations in Lake Baikal, >60 geological structures containing gas hydrates have been identified. These structures are classified into four main types: mud volcanoes, hydrate mounds, seeps, and a pockmark (Khlystov et al., 2018; Khlystov and Kalmychkov, 2020; Khlystov et al., 2022). With the growing number of new gas hydrate sites discovered annually, it has become necessary to standardize all prospecting indicators and geological and geophysical characteristics for sites having each of the four types. The unification required the identification of several reference (model) structures for each type, which collectively exhibit all the characteristic features of that type.

To standardize the characteristics of each structure, all available geological and geophysical information was compiled into tables. Analysis of these tables enabled the identification of two reference structures for each type, except for the pockmark type, as it currently has only a single representative. The standardized characteristics of these six reference hydrate-bearing structures and their locations on the floor of Lake Baikal are presented below (Fig. 1).

Gas hydrate-bearing mud volcanoes in Lake Baikal show positive topographic features, with lateral dimensions ranging from 300 to 1500 m and heights reaching up to 150 m. Their seismic records are characterized by a feeder conduit distinguished by chaotic seismic signal patterns. Gas emissions in bubble form (flares) are sometimes observed as acoustic anomalies in echograms above these volcanoes. A distinctive feature of mud volcanoes is mud breccia within their sedimentary sections—a matrix-supported deposit containing older, denser clay clasts that range in size from 1 mm upwards. Analysis of all available data indicates two subtypes of mud volcanoes in Lake Baikal: solitary and clustered complexes.

The Novosibirsk and AkademKhrebet mud volcanoes can be designated as reference structures for the solitary and clustered subtypes, respectively, as they embody the complete set of the aforementioned characteristics.

Previously, Khlystov and Khabuev (2024) described the Novosibirsk mud volcano in detail and

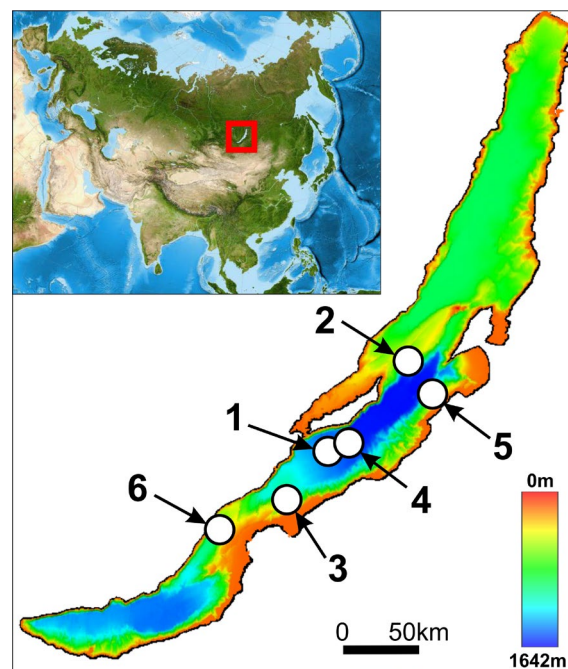


Fig.1. Location map of reference hydrate-bearing structures in Lake Baikal. 1–Novosibirsk; 2–AkademKhrebet; 3–K-11; 4–Novosibirsk-2; 5–Gorevoy Utes; 6–Krasny Yar.

defined it as a reference structure. It incorporates all the typical features of Baikal mud volcanoes and is the site for the most extensive geological and geophysical investigations. It is a positive topographic structure at a depth of 1400 m, with a height of 15-20 m and a diameter of 700-750 m, featuring a vertical gas channel that can be clearly identified on all types of seismic records. Over 10 profiles from various remote geophysical surveys intersect it. Episodic gas flares are visible in echograms above the volcano. Mud breccia was first discovered in this structure in 2005, followed by gas hydrates in 2010. Thirty cores were retrieved from the Novosibirsk mud volcano, the bulk of which contained breccia and five contained gas hydrates. Currently, it is the only mud volcano where mud breccia is found practically at the water-bottom interface; in others, it is buried beneath bottom sediments.

Khlystov et al. (2019) described the Akadem mud volcanic complex (AMVC) in detail. Located at depths of 500-800 m, this 6-km-long complex consists of a linear series of mud volcanoes, whose bases are interconnected. It was discovered in 2009 during a multibeam echosounder survey and is intersected by 10 seismic profiles. The seismic signal beneath the entire complex becomes chaotic, indicating a gas-saturated feeder zone; although individual volcanic conduits cannot be resolved. A persistent gas discharge in the form of flares is observed. Since 2014, geological sampling has yielded 38 cores, with 14 cores containing mud breccia and 15 cores containing gas hydrates. This complex provided the first material evidence in Lake Baikal for the shallow roots of mud volcanism, substantiating the concept of a “Baikal-type” mud volcanism (Khlystov et al., 2019).

Gas hydrate mounds are classified as a separate type of mud volcanoes for several reasons. One of them is the absence of mud breccia in core samples obtained

from these structures. However, breccia may be present at greater depths, as hydrate mounds share strong geophysical and geomorphological similarities with mud volcanoes. They form positive topographic features on the lake floor; seismic records often demonstrate underlying feeder channels, and gas flares are sometimes found above them. Their lateral dimensions range from 60 to 1000 m, with heights up to 80 m. The Novosibirsk-2 and K-11 gas hydrate mounds in the central basin are designated as reference structures. While hydrate mounds are among the least studied gas hydrate objects in the lake, these two possess a standardized set of characteristics for this type of structure.

The K-11 gas hydrate mound was discovered during side-scan sonar surveys in 2002 and 2005, as well as during a multibeam echosounder survey in 2009. It is a 20-m-high elevation with an area of 600 by 500 m at a depth of 430 m. Geological sampling retrieved five cores, two of which contained gas hydrates. Seismic records indicate an acoustically transparent channel beneath the mound. In recent years, gas discharge in the form of a flare has been recorded in echograms above this object (Fig. 2). This structure is clearly defined in the topography and is one of the few where a distinct gas channel is traceable, and episodic gas venting occurs, thus possessing the complete suite of standardized characteristics for hydrate mounds.

The Novosibirsk-2 gas hydrate mound was discovered in 2002 based on data from side-scan sonar (SSS) and seismoacoustic profiling. Due to its great depth (1510 m) and low relief (15 m), this structure is scarcely discernible in the bathymetry derived from multibeam echosounder surveys. However, on the SSS mosaic, it is identified in the relief by shadowing effects and by its distinct backscatter signal compared to the surrounding sediment types. A seismic profile runs directly through the structure, revealing an underlying zone with a chaotic signal pattern, interpreted as a potential gas conduit (Fig. 3). Gas discharge was not observed at this site. The presence of gas hydrates was confirmed in 2015. Four cores were retrieved from this structure, three of which contained gas hydrates. This structure is designated as a reference site, being the deepest known hydrate-bearing structure and one that exhibits the full set of diagnostic features identifiable using side-scan sonar.

The third type of hydrate-bearing structures—seeps—is distinguished by a limited number of characteristic features, which were only observed in specific individual structures. Seeps are not morphologically expressed in the bottom relief, making their detection via seafloor morphology challenging. The discovery of most seeps is primarily associated with the presence of active gas discharge recorded by echosounder.

Prior to the discovery of gas hydrates, these features were identified by the color of surface sediments, which were observed visually in cores or from submersibles. These two characteristics constitute the main prospecting indicators. Beneath each seep, an acoustically defined gas-saturated channel is observed on seismic records, even in the absence of active gas discharge during the survey. Only one seep—Krasny Yar—exhibited

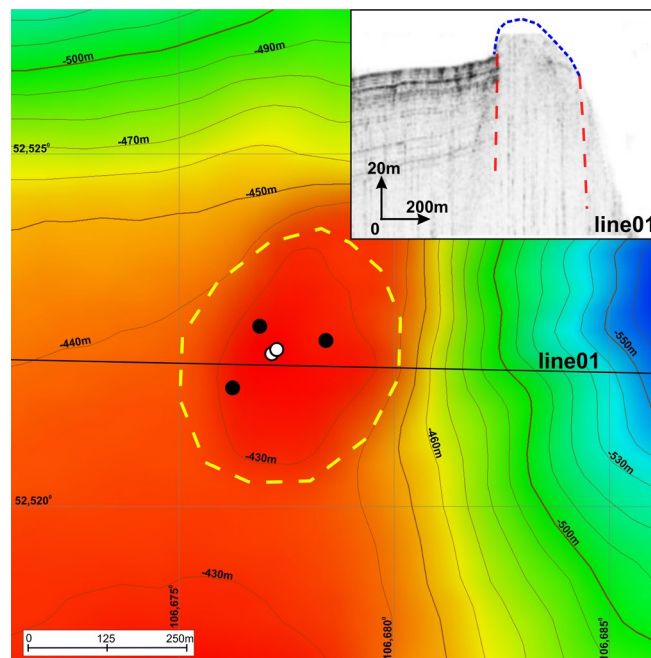


Fig.2. Bathymetric map of the area of the K-11 hydrate mound. The yellow dashed line marks the boundaries of the structure; the white dots indicate cores with hydrates, and the black dots—cores without hydrates. Inset: seismic profile where the blue dashed line marks the surface of the structure, and the red dashed line indicates the gas-saturated channel.

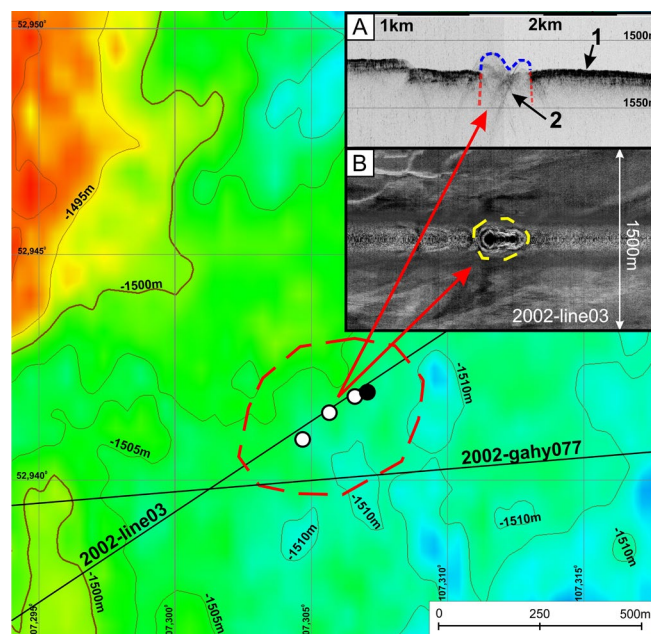


Fig.3. Bathymetric map of the area of the Novosibirsk-2 gas hydrate mound. The red dashed line marks the structure boundaries; the white dots indicate cores with hydrates, and the black dot—a core without gas hydrates. **Inset A:** Seismic profile 2002-line03: 1 – bottom and 2 – Novosibirsk-2 structure. The blue dashed line marks the structure surface, and the red dashed line—the gas-saturated channel. **Inset B:** side-scan sonar record of profile 2002-line03; the yellow dashed line outlines the Novosibirsk-2 structure.

an anomalous spot (530 by 490 m) on side-scan sonar records in 2007. This acoustic signature, similar to features in marine sediments, indicated near-surface gas hydrates (Khabuev et al., 2016). Above this structure, there is an acoustic gas flare on echograms, rising from a depth of 720 m and nearly reaching the lake surface. A total of 19 cores were retrieved from this site, 9 of which contained gas hydrates, with the surface sediment being unoxidized and having a brown color. Thus, this structure possesses all other standardized features (channel, flare, and surface sediment color), establishing it as a reference hydrate-bearing structure of this type. This structure, a typical marine-type seep but with Baikal-specific geochemical characteristics, is the subject of numerous publications (Aloisi et al., 2019; Pogodaeva et al., 2020; Zemskaya et al., 2024).

In Lake Baikal, not only gas-bearing but also oil and gas hydrate-bearing seeps (sites with oil discharge/accumulation associated with gas venting) were discovered. The Gorevoy Utes structure was designated as a reference structure for this subtype. It was discovered through the analysis of satellite images from 2003 to 2005, which indicated a dark spot in the ice cover. Concurrent echosounder surveys detected an acoustic flare, and oil droplets were observed on the water surface. In 2006, the first cores containing both oil and gas hydrates in Lake Baikal were retrieved here (Khlystov et al., 2007). Overall, 50 cores were collected, with 10 containing gas hydrates and 17 containing oil. Furthermore, this area was studied in detail using the MIR submersibles, which revealed patches of grey and yellow sediments on the floor at the seep site, contrasting sharply with the surrounding brown silt. Within this seep area, gas hydrate-bitumen mounds (discharging both oil and gas) and bitumen mounds (discharging only oil) were also discovered. Seismic profiles delineated a narrow gas conduit beneath the site (Khlystov et al., 2007).

As a result of the unification of geological and geophysical information on all gas hydrate-bearing structures and the allocation of reference structures from them, we created the database “Reference hydrate-bearing structures of Lake Baikal”, which is visualized on the LIN SB RAS website (<http://lin.irk.ru/oporniki>), representing a set of tables and images linked together by hyperlinks. This facilitated the complex analysis of structures among themselves within each type and allowed us to optimize their classification according to the specified characteristics of the geological section. This will further help in the search for new hydrate-bearing structures at the bottom of Lake Baikal.

4. Conclusion

We unified the geological and geophysical characteristics of gas hydrate-bearing structures in Lake Baikal. This work enabled the identification of reference hydrate-bearing structures among mud volcanoes (Novosibirsk and AkademKhrebet), hydrate mounds (Novosibirsk-2 and K-11), and seeps (Krasny Yar and Gorevoy Utes).

We defined unique diagnostic features for each type of structure, which were exemplified by the selected reference sites. All the information used for this purpose was compiled into a database, facilitating further work with geological and geophysical data and helping in the search for new gas hydrate accumulations.

Acknowledgements

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the Project of Limnological Institute Siberian Branch of Russian Academy of Sciences No. 0279-2021-0006.

The authors thank the crews of the research vessels “Titov” and “Vereshchagin” (Center for Collective Use “Research vessels Center of LIN SB RAS on Lake Baikal”) for assistance in conducting geological and geophysical work.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Aloisi G., Pogodaeva T.V., Poort J. et al. 2019. Biogeochemical processes at the Krasny Yar seepage area (Lake Baikal) and a comparison with oceanic seeps. *Geo-Marine Letters* 39(1): 59–75.
- Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Belov I.S. 2002. Catalogue of recorded eruptions of mud volcanoes in Azerbaijan (1810–2001). Baku: Nafta-Press. (in Russian)
- Aliyev Ad.A., Guliyev I.S., Dadashev F.G. et al. 2015. Atlas of mud volcanoes of the world. Baku: Nafta-Press. (in Russian)
- Bazha S.N., Andreev A.V., Bogdanov E.A. et al. 2022. Spatial database of ecosystems of the Lake Baikal basin. *Aridnye ekosistemy [Arid ecosystems]* 28, 3(92): 14–22. DOI: [10.24412/1993-3916-2022-3-14-22](https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-3-14-22) (in Russian)
- De Batist M., Klerkx J., Van Rensbergen P. et al. 2002. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia? *Terra Nova* 14(6): 436–442.
- Ershov V.V., Bondarenko D.D. 2020. Characteristics of the isotopic and chemical composition of gases emitted by mud volcanoes from different regions of the world. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology [Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya]* 3: 23–35. DOI: [10.31857/S0869780920030029](https://doi.org/10.31857/S0869780920030029) (in Russian)
- Etiope G. 2009. A global dataset of onshore gas and oil seeps: a new tool for hydrocarbon exploration. *Oil and Gas business [Neftegazovoe delo]* 2: 14. (in Russian)
- Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R. et al. 1997. Estimation of the heat flow on Lake Baikal based on seismic data of gas hydrate lower boundary. *Russian Geology and Geophysics* 38(10): 1677–1691.
- Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P. et al. 1992. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology* 20(7): 589–592. DOI: [10.1130/0091-7613\(1992\)020](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020)
- Khabuev A.V., Chenskiy D.A., Solovieva M.A. et al. 2016. Gas hydrate resources estimation by geophysical methods in “Krasny Yar” underwater gas seep of Lake Baikal. *Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore depos-*

its [Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii] 1(54): 67–74. (in Russian)

Khlystov O.M., Gorshkov A.G., Egorov A.V. et al. 2007. Oil in the Lake of World Heritage. *Doklady Earth Sciences* [Doklady Akademii Nauk] 414(5): 656–659. (in Russian)

Khlystov O.M., Minami H., Hachikubo A. et al. 2017. Age of mud breccia from mud volcanoes in Academician Ridge, Lake Baikal. *Geodynamics & Tectonophysics* [Geodinamika i tektonofizika] 8(4): 923–932. DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0324](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0324). (in Russian)

Khlystov O.M., Khabuev A.V., Minami H. et al. 2018. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 1: 66–70. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-66](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66)

Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A. et al. 2019. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. *Marine and Petroleum Geology* 102: 580–589. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005)

Khlystov O.M., Kalmychikov G.V. 2020. Baikal gas hydrates: history of discovery and main results. In: Kuzmin M.I. (Ed.), 30 years of the Baikal Drilling Program. Novosibirsk, pp. 278–294.

Khlystov O.M., Batist M., Minami H. et al. 2022. The position of gas hydrates in the sedimentary strata and in the geological structure of Lake Baikal. In: Jürgen Mienert (Ed.) *World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins*. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, pp. 465–515.

Khlystov O.M., Khabuev A.V. 2024. «Novosibirsk» Mud Volcano and Evidence of Its Activations (Lake Baikal). *Geodynamics & Tectonophysics* [Geodinamika i tektonofizika] 15 (1): 1–8. DOI: [10.5800/GT-2024-15-1-0739](https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0739) (in Russian)

Klerkx Ya., Zemskaya T.I., Matveeva T.V. et al. 2003. Methane hydrates in the surface layer of deep-sea sediments of Lake Baikal. *Doklady Earth Sciences* 393(9): 1342–1346.

Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Moskvina V.I. et al. 2007. Petroleum potential of Baikal deposits. *Russian Geology and Geophysics* 48(12): 1346–1356.

Lunina O.V. 2016. Digital map of faults for the Pliocene-Quaternary stage of the earth's crust development in the south of Eastern Siberia and the adjacent territory of Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics* [Geodinamika i tektonofizika] 7(3): 407–434. DOI: [10.5800/GT-2016-7-3-0215](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215) (in Russian)

Matveeva T.V. 2024. Gas hydrates of Russian waters: geological features, resource base and study prospects. In: *Proceedings of the First Russian Gas Hydrate Conference*, pp. 181–186. DOI: [10.24412/cl-37274-2024-1-181-186](https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-181-186) (in Russian)

Pogodaeva T.V., Poort J., Aloisi G. et al. 2020. Fluid migrations at the Krasny Yar methane seep of Lake Baikal according to geochemical data. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 123–131. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.08.003)

Poort J., Khlystov O.M., Naudts L. et al. 2012. Thermal anomalies associated with shallow gas hydrates in the K-2 mud volcano, Lake Baikal. *Geo-Marine Letters* 32(5): 407–417.

Zemskaya T.I., Lomakina A.V., Pogodaeva T.V. et al. 2024. Microbial communities in the fluid migration zone in the sediments of the Krasny Yar methane seep (South Baikal) *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1155–1179. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-1155](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-1155)

Yakubov A.A., Alizade A.A., Zeynalov M.M. 1971. *Mud volcanoes of the Azerbaijan SSR*. Baku: Elm. (in Russian)

Унификация геолого-геофизических характеристик гидратоносных структур оз. Байкал

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Хабуев А.В.*^{ORCID}, Хлыстов О.М.^{ORCID}

Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведена унификация геолого-геофизических характеристик гидратоносных структур озера Байкал. Для этого были собраны и проанализированы все имеющиеся на данный момент времени первичные и обработанные данные. Детально изучено более 400 сейсмоакустических профилей, 50 сонограмм гидролокатора бокового обзора, 60 участков рельефа дна данных многолучевого эхолота и более 1000 первичных описаний кернов донных отложений. В результате определены 6 опорных (модельных, образцовых) гидратоносных структур (2 грязевых вулкана, 2 гидратных холма и 2 сипа), которые наиболее полно характеризуют каждый из перечисленных их типов. Унификация характеристик гидратоносных структур озера Байкал и выделение опорных структур упростит исследования уже известных и поиск новых мест с содержанием в донных осадках приповерхностных газовых гидратов.

Ключевые слова: унификация, грязевой вулкан, сип, гидратный холм

Для цитирования: Хабуев А.В., Хлыстов О.М. Унификация геолого-геофизических характеристик гидратоносных структур оз. Байкал // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 6. - С. 1355-1366. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-6-1355

1. Введение

Изучение газовых гидратов в Мировом океане затрагивает исследования грязевых вулканов, нефтепроявлений, зоны разломов, эмиссии метана, запасов углеводородов. К настоящему времени проведен ряд работ по обобщению значительного объема информации в данной тематике. Такие работы представлены в основном в виде каталогов и атласов (Якубов и др., 1971; Алиев и др., 2002; 2015), либо баз данных конкретных измерений или явлений (Etiope, 2009; Ершов и Бондаренко, 2020). Для оценки ресурсов углеводородов газовых гидратов в акватории морей России создана обобщающая база данных (Матвеева, 2024). Озеро Байкал также можно отнести к акватории с углеводородным потенциалом, часть которого содержится в виде газовых гидратов (Конторович и др., 2007). Для Байкальского региона существуют базы данных, среди которых можно выделить базу данных сейсмических разломов (Лунина, 2016), пространственную базу данных экосистем (Бажа и др., 2022), каталог данных об эпицентрах региональных землетрясений с 1960 года (<https://www.seis-bykl.ru/index.php>).

С открытием приповерхностных газовых гидратов на Байкале в 2000 г. шло накопление геолого-геофизической информации на озере для поиска и изучения геологии их скоплений в первых 5 м донных отложений. За 25 лет работ, проведенных по всей акватории озера Байкал, накоплен достаточно большой массив данных о поверхностном строении донных отложений озера и скоплениях газовых гидратов в разных геологических обстановках. Многоканальные сейсмические исследования 1989-1992 гг. показали, что осадочная толща южной и средней котловин озера имеет мощность до 10 км, и ее возраст оценивается олигоцен-миоценовым временем. (Hutchinson et al., 1992; Golmshtok et al., 1997). Многочисленные разломы на сейсмических профилях, обусловленные высокой сейсмичностью региона, позволяют делать выводы о хороших коллекторах, по которым глубинные газонасыщенные флюиды достигают поверхности дна. При достаточных термобарических условиях, ниже определенной глубины воды (для Байкала это 360-380 м), метан может образовывать газовые гидраты вблизи поверхности дна (De Batist et al., 2002; Клеркс и др., 2003). Многолетние геолого-геофизические и гидрологические исследования дна позво-

*Автор для переписки. Адрес e-mail: shock@lin.irk.ru (А.В Хабуев)

Поступила: 07 ноября 2025;

Принята после доработки: 15 декабря 2025;

Опубликована online: 25 декабря 2025

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



лили открыть более 60 мест с приповерхностными газовыми гидратами. Отдельные из них подробно рассмотрены в работах (De Batist et al., 2002; Poort et al., 2012; Хабуев и др., 2016, Хлыстов и др., 2017; Khlystov et al., 2019; 2022; Хлыстов и Калмычков, 2020; Хлыстов и Хабуев, 2024). Благодаря чему были выделены 4 типа гидратоносных структур (грязевые вулканы, гидратные холмы, сипы и пок-марки) и обоснованы их поисковые признаки по геолого-геофизическим данным (Khlystov et al., 2018, Хлыстов и Калмычков, 2020; Khlystov et al., 2022). Один из них, грязевой вулкан «Новосибирск», был определен как опорный (модельный), содержащие в себе все признаки грязевого вулканизма (Хлыстов и Хабуев, 2024).

Поиск объединенной информации по отдельным структурам или типам структур в настоящее время затруднен, так как нет единой базы данных по гидратоносным структурам озера, и информация о каждом из них разбросана по различным литературным источникам и представлена там в не полном объеме. В данной работе на основе анализа всех геолого-геофизических данных и унификации характеристик каждого типа гидратоносных структур, выполнена оптимизация их классификации и выделено несколько опорных структур. Для удобства работы с разнопрофильными данными по каждой из опорных структур создана локальная база данных.

2. Материалы и методы

Прямое геологическое исследование донных отложений осуществлялось с помощью прямооточной гравитационной стальной трубы наружным диаметром 127 мм с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала») и со льда с помощью передвижного спускоподъемного комплекса, буксируемого автомобилями ГАЗ-66. Использовались гравитационные трубы длиной 3,5 и 5 м, каждая из которых оборудована кернорвателем и верхним клапаном, что препятствовало размыву и выпадению грунта и газовых гидратов при подъеме. Внутри трубы вставлялся пластиковый вкладыш, в который отбирались донные отложения и газовые гидраты. При подъеме вкладыш вынимался и разрезался вдоль на две половинки и получался непрерывный геологический разрез донных отложений до 5 м. Керна фотографировался, и проводилось первичное литологическое описание с использованием шкалы определения цвета почв «Standard soil color chart» системы Манселла. При этом выделялись интервалы, содержащие окисленный слой, карбонаты, грязевулканическую брекчию, газовые гидраты и нефть. Всего в районах гидратоносных структур было отобрано более 1000 кернов донных отложений, из которых более 360 содержали газовые гидраты.

До отбора кернов по акватории озера проводилось дистанционное зондирование осадочного чехла озера Байкал разными методами и оборудованием. Работы по изучению внутреннего строения верхней части геологического разреза проводились

методами непрерывного сейсмопрофилирования: методом обратных волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) (многоканальная сейсмосьемка), методом непрерывного сейсмаакустического профилирования (НСП) (одноканальная) и профилированием с помощью профилографа. Каждый из методов имел свою глубину проникновения вглубь донных отложений и разрешение. По сути, они дополняли друг друга при поиске и изучении гидратоносных структур. Геофизические работы методом МОВ-ОГТ выполнялись до открытия газовых гидратов, но именно на их основе был сделан вывод о наличии гидратов в Байкале и определены первые районы их поиска вблизи поверхности. Сейсмические съемки проводились в 1989 и 1992 гг. и охватывали восточную часть южной, большую часть средней, и южную часть северной котловин. В качестве источника сигнала использовалась воздушная пушка объемом 27,3 л. Интервал между выстрелами составлял 4 мсек. Приемник позволял вести запись с 96 каналов, при этом количество общих глубинных точек составляло 24. Такое оборудование выдавало данные с разрешением 10 м по вертикали и до 300 м по горизонтали, глубина проникновения составляла более 3 км. Общая протяженность 60 профилей составила более 2200 км (1992 г).

Метод НСП применялся при поисковых геофизических работах 1999-2008 гг. Сеть профилей неравномерно покрывало практически всю акваторию озера Байкал. Источником упругих волн служили как воздушная пушка «Шип» и «Импульс-1», так и электроискровой источник «Спаркер». В качестве приемника использовалась одноканальная коса. Это позволяло получать данные с разрешением по вертикали и горизонтали – 1-3 м и 80-170 м, соответственно. Проникновение сигнала в осадки составляло от 400 (электроискровой источник) до 700 (воздушная пушка) метров. Проанализировано более 200 профилей общей протяженностью более 3000 км.

Сейсмаакустический профилограф, работающий на частоте от 1 кГц до 8 кГц (обычно 6кГц), реализован на принципе излучения акустических импульсов вертикально вниз и приеме эхо-сигналов, отраженных от поверхности дна и отражающих горизонтов поддонной осадочной толщи. Профилограф позволял зондировать разрез донных отложений мощностью до 30 м. За последние 25 лет получено более 1500 погонных километров профилей, большая часть из которых выполнялась именно в районах гидратоносных структур. Всего проанализировано более 140 профилей, секущих гидратоносные структуры.

Для детального изучения рельефа дна озера и поиска гидратоносных объектов выполнены съемки дна гидролокатором бокового обзора (ГБО), однолучевым и многолучевым эхолотами. В 2009 году впервые на озере Байкал применен многолучевой эхолот SEABEAM 1050. Он имел частоту излучения акустического сигнала 50 кГц, 96 лучей, общая полоса обзора составляет 120°. Разрешающая горизонтальная способность зависела от глубины воды и составляла от 5 до 40 метров, что минимум в 4

раза точнее предыдущих батиметрических данных. Этого было достаточно для поиска на дне отрицательных и положительных аномалий в рельефе, связанных с разгрузкой газа и накопления в донных отложениях газовых гидратов. Общая протяженность профилей составила 12600 погонных километров, а площадь съемки более 15000 км².

Однолучевой эхолот позволял не только отслеживать неровности дна и контролировать пробоотбор, но и вести поиск выхода газа в пузырьковой форме («факел») над структурами. Для работ использовался судовой двухчастотный эхолот Furuno FCV-1100 (Япония), оснащенный антеннами, настроенные на двухчастотный режим 28 и 200 кГц, длительность импульса составляла 1 мс. Однолучевые антенны имели диаграмму направленности 21° для 28 кГц и 6° для 200 кГц излучения.

ГБО «СНИК-3» работал на частоте 30 кГц и регистрировал аномалии в рельефе дна на глубинах от 5 до 1600 м с точностью не хуже 0,5 % от значения глубины. На сонограммах ГБО отображались формы рельефа дна, а сигнал обратного рассеивания позволял отследить литологические особенности строения дна на глубину первых метров. Всего по Южному и Среднему Байкалу съемки ГБО выполнены площади равной 2300 км².

3. Результаты / Обсуждение

С момента обнаружения первых скоплений приповерхностных газогидратов на озере Байкал открыто свыше 60 геологических структур, содержащие газовые гидраты. Эти структуры разделены на 4 типа: грязевые вулканы, гидратные холмы, сипы и покмарк (Khlystov et al., 2018, Хлыстов и Калмычков, 2020; Khlystov et al., 2022). С ростом количества ежегодно открываемых новых мест с газовыми гидратами, стало очевидным, что требуется унификация всех поисковых признаков и геолого-геофизических характеристик этих мест по каждому из 4 типов. Для наглядности требовалось выделение в каждой из них нескольких опорных (модельных) структур, сочетающиеся в себе все признаки данного типа. Для унифицирования всех характеристик каждой структуры вся геолого-геофизическая информация по ним была сведена в таблицы, анализ которых позволил выделить по 2 структуры в каждом типе, за исключением покмарка, так как он пока является единственным представителем этого типа. Ниже приведены унифицированные характеристики 6 опорных гидратоносных структур и их положение на дне озера Байкал (Рис. 1).

Гидратоносные грязевые вулканы на озере Байкал имеют положительную форму рельефа с поперечными размерами от 300 до 1500 м и высотой до 150 м. На сейсмических записях у них имеется подводный канал, выделяющийся по хаотичному рисунку сейсмосигнала. Иногда в районе грязевого вулкана фиксируются выходы газа в пузырьковой форме в виде акустической аномалии скорости звука на эхограммах – «факел». Отличительной чертой грязевых вулканов является наличие в осадочном разрезе вулкана грязевулканической брекчия

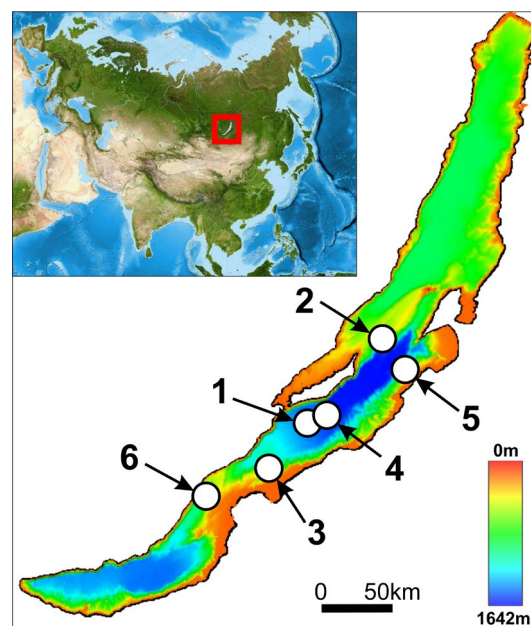


Рис.1. Карта-схема расположения опорных гидратоносных структур оз.Байкал. 1- «Новосибирск», 2- «АкадемХребет», 3- «К-11», 4- «Новосибирск-2», 5- «Горевой Утес», 6- «Красный яр».

– включения в глинистой матрице более древних и плотных обломков глин размерами от 1 мм. Как показал анализ всех данных о грязевых вулканах, на Байкале выделяются два подтипа – одиночные и групповые. Полным набором вышеперечисленных характеристик по каждому из подтипов можно выделить в качестве опорных грязевых вулканов - «Новосибирск» и «АкадемХребет».

Ранее грязевой вулкан «Новосибирск» был детально описан и определен нами, как опорный в работе Хлыстова и Хабуева (2024). Этот вулкан включает в себя все признаки и характеристики грязевых вулканов озера и обладает наибольшим количеством выполненных в его районе геолого-геофизических исследований. Он является положительной топографической структурой на глубине 1400 м. высотой 15-20 м и диаметром 700-750 м, с подводным вертикальным газовым каналом, хорошо фиксируемый на всех типах сейсмических записей. Всего его пересекает более 10 профилей разных типов дистанционного геофизического зондирования. Периодически над вулканом на эхограммах виден «факел». Впервые в данной структуре грязевулканическая брекчия была обнаружена в 2005 году, а газовые гидраты в 2010. Из грязевого вулкана «Новосибирск» было отобрано 30 кернов, большинство из которых содержали в себе брекчию, а 5 из них и газовые гидраты. Это пока единственный грязевой вулкан, где грязевулканическая брекчия практически выходит на раздел «вода-дно». В других вулканах она погребена донными отложениями.

Групповой комплекс грязевых вулканов «АкадемХребет» детально описан в работе (Khlystov et al., 2019). Этот комплекс на интервале глубин 500-800 м состоит из вытянутых в ряд грязевых вулканов, кратеры которых соединены между собой в основании на протяжении 6 км. Он был открыт по результатам съемки многолучевым эхолотом

в 2009 г. Этот комплекс пересекает 10 различных сейсмопрофилей. В этих местах сигнал становится хаотичным, т.е. вся зона под этим комплексом вулканов представляет собой газонасыщенный канал поступления материала с глубины, при этом выделить отдельные вулканические каналы не удалось. Газовая разгрузка в виде «факела» в районе данной структуры наблюдается постоянно. Начиная с 2014 года, в ходе геологических работ были отобраны 38 кернов, из них 14 с грязевулканической брекчией, а 15 с газовыми гидратами. Этот комплекс является первым местом на Байкале, где вещественно доказана малоглубинность корней грязевого вулканизма, что позволило обосновать существование Байкальского типа грязевого вулканизма (Khlystov et al., 2019).

Гидратные холмы выделены в отдельный тип от грязевых вулканов по ряду причин, одна из которых – это отсутствие грязевулканической брекчии в разрезе кернов, полученных с этих структур. Возможно, она есть на более глубоких горизонтах, так как гидратные холмы по геофизическим и геоморфологическим признакам они очень похожи на грязевые вулканы. Они имеют положительную форму в рельефе дна, и на сейсмических записях можно увидеть подводящий канал, иногда над ними есть «факел». Их размеры в поперечных разрезах варьируются от 60 м до 1000 м и высотой до 80 м. К опорным структурам отнесены гидратные холмы «Новосибирск-2» и «К-11», расположенные в средней котловине озера. Гидратные холмы наименее изучены гидратоносные объекты на озере, но эти два обладают унифицированным набором характеристик данного типа гидратоносных структур.

Гидратный холм «К-11» обнаружен в ходе работ с ГБО в 2002 и 2005 гг. и многолучевым эхолотом в 2009 г. Он представляет собой возвышенность размерами 600 на 500 м и высотой 20 м на глубине 430 м. При геологическом опробовании было отобрано 5 кернов, в 2-х из которых находились газогидраты. Под возвышенностью имеется акустически прозрачный канал на сейсмических записях. Над этим объектом в последние годы на эхограммах отмечается разгрузка газа в виде «факела» (Рис. 2). Данная структура отчетливо видна в рельефе и одна из немногих, где отчетливо прослежен газовый канал и имеется эпизодический выход газа, т.е. обладает всем комплексом унифицированных характеристик гидратных холмов.

Гидратный холм «Новосибирск-2» открыт в 2002 году по результатам работ ГБО и сейсмоакустического профилографа. Из-за большой глубины (1510 м) и небольшой высоты (15 м) на данных съемки многолучевого эхолота эта структура практически не выражена в рельефе. Однако на мозаике ГБО она выделяется в рельефе по полутеням и по сигналу обратного рассеивания от окружающих типов осадка. Сейсмопрофиль проходит непосредственно через структуру, что позволило проследить на нем область с хаотичным рисунком сигнала под структурой, подобие газового канала (Рис. 3). Разгрузка газа здесь не отмечалась.

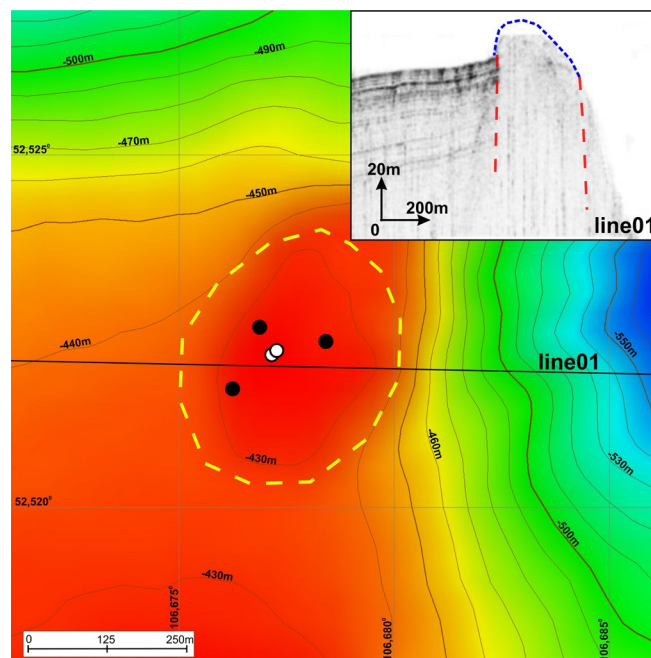


Рис.2. Батиметрическая схема района грязевого холма «К-11». Желтый пунктир – границы структуры, белые точки – керны с гидратами, черные точки – без гидрата. На врезке: сейсмический профиль, синий пунктир – поверхность структуры, красный – газонасыщенный канал.

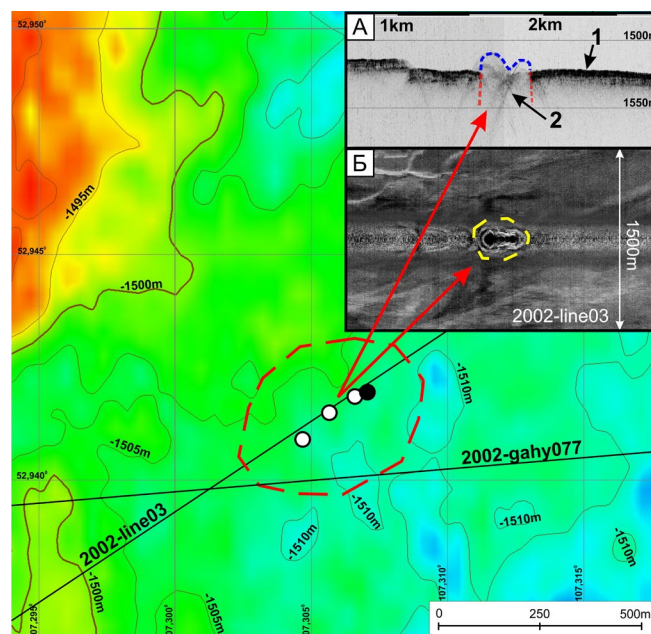


Рис.3. Батиметрическая схема района грязевого холма «Новосибирск-2». Красный пунктир – границы структуры, белые точки – керны с гидратами, черная точка – без гидрата. На врезке А: сейсмический профиль 2002-line03, 1 – дно, 2- структура «Новосибирск-2», синий пунктир – поверхность структуры, красный – газонасыщенный канал. На врезке Б: сонограмма ГБО профиля 2002-line03, желтым пунктиром – структура «Новосибирск-2».

Гидратоносность холма была доказана в 2015 г. На данной структуре отобрано 4 керна, 3 из которых содержат газовые гидраты. Эту структуру отнесли к опорным, как представителя самой глубоководной гидратоносной структуры и имеющей весь набор признаков, которые можно получить с помощью ГБО.

Третий тип гидратоносных структур – сипы, выделяется по немногочисленным признакам, которые встречались только в той или иной структуре. Сипы никак не выражены в рельефе, что затрудняет их поиск по морфологии дна. Их обнаружение у большинства связано с наличием разгрузки газа, фиксирующиеся на эхолоте. До находок газовых гидратов их идентифицировали по цвету поверхностного осадка, визуально наблюдаемого в кернах или с помощью подводных аппаратов. Это два основных поисковых признака. Под каждым из сипов на сейсмических записях отмечался акустический газонасыщенный канал, даже если разгрузка газа в момент съемки отсутствовала. Только у одного сипа – «Красный Яр», на сонограммах ГБО в 2007 г. отмечалось аномальное пятно в сигнале бокового отражения размером 530 на 490 м, которое, как и в морских осадках, характеризовало наличие в нем приповерхностных газовых гидратов (Хабуев и др., 2016). Над структурой на эхограммах присутствует «факел», почти достигающий поверхности озера с глубины 720 м. Количество отобранных кернов составляет 19 шт., из которых 9 с содержанием газовых гидратов, поверхностный осадок которых не был окисленным и имел коричневый цвет. Таким образом, у этой структуры присутствовали все остальные унифицированные признаки (канал, факел, цвет поверхностного осадка), поэтому данный сип был отнесен к опорным гидратоносным структурам данного типа. Именно этой структуре, как типичного морского сипа, но с байкальскими геохимическими особенностями, посвящены многие публикации (Aloisi et al., 2019; Pogodaeva et al., 2020; Земская и др., 2024).

На Байкале обнаружены не только газовые, но и нефтегазовые гидратоносные сипы (разгрузка/скопления нефти в месте разгрузки газа). К опорным нами была отнесена структура «Горевой Утес». Она открыта благодаря анализу спутниковых снимков 2003-2005 гг., на которых во льду было видно темное пятно, на эхограммах выявлен «факел», а на водной поверхности всплывающие капли нефти. В 2006 году впервые на Байкале здесь отобраны керны, которые одновременно содержали нефть и газовые гидраты (Хлыстов и др., 2007). Всего было отобрано 50 кернов, из которых 10 содержали газовые гидраты, а 17 нефть. Кроме того, этот район детально был исследован с помощью ГОА «МИР», что позволило обнаружить на месте сипа участки дна серого и желтого цветов, которые контрастно отличались от коричневого ила вокруг них. В районе этого сипа также открыты гидрато-битумные постройки, где шла разгрузка нефти одновременно с газом, и битумные постройки, где разгружалась только нефть. На сейсмопрофилях выделялся узкий газовый канал (Хлыстов и др., 2007).

В результате унификации геолого-геофизической информации по всем гидратоносным структурам и выделения из них опорных, была создана база данных «Опорные гидратоносные структуры оз. Байкал», которая визуализирована на сайте ЛИН СО РАН (<http://lin.irk.ru/oporniki>) и представляет собой набор таблиц и изображений, связанных между собой посредством гиперссылок.

4. Заключение

Проведена унификация геолого-геофизических признаков гидратоносных структур озера Байкал, которая позволила выделить опорные гидратосодержащие структуры среди грязевых вулканов («Новосибирск» и «АкадемХребет»), гидратных холмов («Новосибирск-2» и «К-11») и сипов («Красный Яр» и «Горевой Утес»). Для каждого типа структур выделены характерные только для него признаки и характеристики, которые нашли свое отражение в опорных структурах. Вся использованная для этого информация сведена в базу данных, которая упростит дальнейшую работу с геолого-геофизическими данными, и поможет в поисках и исследованиях новых гидратоносных объектов озера.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках темы государственного задания Лимнологического института СО РАН (0279–2021–0006).

Авторы выражают благодарность командам НИС «Титов» и НИС «Верещагин» (ЦКП «Центр комплексных судовых исследований Байкала») за помощь в проведении геолого-геофизических работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Белов И.С. 2002. Каталог зафиксированных извержений грязевых вулканов Азербайджана (1810–2001 гг.). Баку: Nafta-Press.
- Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г. и др. 2015. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta-Press.
- Бажа С.Н., Андреев А.В., Богданов Е.А. и др. 2022. Пространственная база данных экосистем бассейна оз. Байкал. Аридные экосистемы 28, 3(92): 14–22. DOI: [10.24412/1993-3916-2022-3-14-22](https://doi.org/10.24412/1993-3916-2022-3-14-22)
- Ершов В.В., Бондаренко Д.Д. 2020. Характеристика изотопного и химического состава газов, выбрасываемых грязевыми вулканами из разных регионов мира. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология 3: 23–35. DOI: [10.31857/S0869780920030029](https://doi.org/10.31857/S0869780920030029)
- Земская Т.И., Ломакина А.В., Погодаева Т.В. и др. 2024. Микробные сообщества в зоне миграции флюидопотоков в донных отложениях метанового сипа Красный Яр (Южный Байкал). *Limnology and Freshwater Biology* 4: 1155–1179. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-4-1155](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-4-1155)

- Клеркс Я., Земская Т.И., Матвеева Т.В. и др. 2003. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал. Доклады Академии Наук 393(6): 822–826.
- Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. 2007. Нефтегазоносность отложений оз. Байкал. Геология и геофизика 48(12): 1346–1356.
- Лунина О.В. 2016. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры Юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии. Геодинамика и тектонофизика 7(3): 407–434. DOI: [10.5800/GT-2016-7-3-0215](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-3-0215)
- Матвеева Т.В. 2024. Газовые гидраты российских акваторий: геологические особенности, ресурсная база и перспективы изучения. В: Материалы первой Российской газогидратной конференции, пос. Листвянка, С. 181–186. DOI: [10.24412/cl-37274-2024-1-181-186](https://doi.org/10.24412/cl-37274-2024-1-181-186)
- Хабуев А.В., Ченский Д.А., Соловьева М.А. и др. 2016. Оценка ресурсов газовых гидратов геофизическими методами в зоне подводной разгрузки газа на сипе «Красный Яр» озера Байкал. Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений 1(54): 67–74.
- Хлыстов О.М., Горшков А.Г., Егоров А.В. и др. 2007. Нефть в озере мирового наследия. Доклады Академии Наук 414(5): 656–659.
- Хлыстов О.М., Минами Х., Хачикубо А. и др. 2017. Возраст грязевой брекчии грязевых вулканов Академического хребта озера Байкал. Геодинамика и тектонофизика 8(4): 923–932. DOI: [10.5800/GT-2017-8-4-0324](https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0324)
- Хлыстов О.М., Калмычков Г.В. 2020. Байкальские газовые гидраты: история открытия и основные результаты. В: Кузьмин М.И. (ред.), 30 лет программе «Байкал-бурение». Новосибирск, С. 278–294.
- Хлыстов О.М., Хабуев А.В. 2024. Грязевой вулкан «Новосибирск» и свидетельства его активизаций (оз. Байкал). Геодинамика и тектонофизика 15 (1): 1–8. DOI: [10.5800/GT-2024-15-1-0739](https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-1-0739)
- Якубов А.А., Ализаде А.А., Зейналов М.М. 1971. Грязевые вулканы Азербайджанской ССР. Баку: Элм.
- Aloisi G., Pogodaeva T.V., Poort J. et al. 2019. Biogeochemical processes at the Krasny Yar seepage area (Lake Baikal) and a comparison with oceanic seeps. Geo-Marine Letters 39(1): 59–75.
- De Batist M., Klerks J., Van Rensbergen P. et al. 2002. Active Hydrate Destabilization in Lake Baikal, Siberia? Terra Nova 14(6): 436–442.
- Etioppe G. 2009. A global dataset of onshore gas and oil seeps: a new tool for hydrocarbon exploration. Электронный научный журнал Нефтегазовое дело 2: 14.
- Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R. et al. 1997. Estimation of the heat flow on Lake Baikal based on seismic data of gas hydrate lower boundary. Russian Geology and Geophysics 38(10): 1677–1691.
- Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P. et al. 1992. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. Geology 20 (7): 589–592. DOI: [10.1130/0091-7613\(1992\)020](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020)
- Khlystov O.M., Khabuev A.V., Minami H. et al. 2018. Gas hydrates in Lake Baikal. Limnology and Freshwater Biology 1: 66–70. DOI: [10.31951/2658-3518-2018-A-1-66](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66)
- Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A. et al. 2019. Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. Marine and Petroleum Geology 102: 580–589. DOI: [10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005)
- Khlystov O.M., Batist M., Minami H. et al. 2022. The position of gas hydrates in the sedimentary strata and in the geological structure of Lake Baikal. In: Jürgen Mienert (Ed.), World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins. Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, pp. 465–515.
- Pogodaeva T.V., Poort J., Aloisi G. et al. 2020. Fluid migrations at the Krasny Yar methane seep of Lake Baikal according to geochemical data. Journal of Great Lakes Research 46(1): 123–131. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.08.003](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.08.003)
- Poort J., Khlystov O.M., Naudts L. et al. 2012. Thermal anomalies associated with shallow gas hydrates in the K-2 mud volcano, Lake Baikal. Geo-Marine Letters 32(5): 407–417.