

УДК 550.83.556.3:(282.256.341)

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В ЗОНЕ ПОДВОДНОЙ РАЗГРУЗКИ ГАЗА НА СИПЕ «КРАСНЫЙ ЯР» ОЗЕРА БАЙКАЛ**© А.В. Хабуев¹, Д.А. Ченский², М.А. Соловьева³, О.В. Белоусов⁴, Е.Е. Кононов⁵, О.М. Хлыстов⁶**^{1,4,6}Лимнологический институт СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3.²Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1.⁵Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.

Байкал – единственное пресное озеро в мире, где были найдены газовые гидраты. За последние 15 лет было открыто более 30 мест их распространения и определены основные поисковые признаки. До недавнего времени единственными геофизическими признаками наличия газовых гидратов в донном осадке были определенные положительные формы рельефа на батиметрической карте и наличие акустически жестких рефлекторов в газовом канале на сейсмограмме. В данной работе определен еще один поисковый признак – аномалии в сигнале обратного рассеивания, полученного при съемках дна гидролокатором бокового обзора (ГБО).

В условиях соленой воды аномалии в сигнале обратного рассеивания ГБО могут быть связаны с несколькими причинами: с геоморфологическими особенностями рельефа, с наличием в донных осадках аутигенных карбонатов, грубозернистого материала или приповерхностных газовых гидратов. В условиях пресной воды на основе изучения батиметрической карты и результатов геологического опробования установлена парагенетическая связь между такими аномалиями и наличием в них приповерхностных газовых гидратов для оз. Байкал.

Было предположено, что вертикальное распределение газовых гидратов равномерно до их нижней границы стабильности (BSR). На основе определения площадей аномальных пятен на сонограмме и глубины залегания BSR на сейсмопрофилях был проведен подсчет максимально возможных ресурсов газовых гидратов в зоне разгрузки газонасыщенного флюида в отдельно взятых структурах как аналогов рудного тела низкотемпературного гидротермального месторождения.

Впервые для пресноводного водоема была доказана связь аномалий в данных ГБО с наличием в донных отложениях приповерхностных газовых гидратов. Благодаря измерению площади таких аномалий и предположению о равномерности распределения газовых гидратов в осадке были подсчитаны максимально возможные ресурсы гидратоносных структур, что поможет в будущем оценить общие запасы газовых гидратов для оз. Байкал.

Ключевые слова: озеро Байкал; гидролокатор бокового обзора; газовые гидраты; ресурсы.

¹Хабуев Андрей Владимирович, ведущий инженер лаборатории геологии оз. Байкал, e-mail: shock@lin.irk.ru

Khabuev Andrei, Leading Engineer of the Laboratory of Lake Baikal Geology, e-mail: shock@lin.irk.ru

²Ченский Дмитрий Александрович, электронщик кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем, e-mail: dimpson06@yandex.ru

Chenskiy Dmitriy, Electronic Engineer of the Department of Radio Electronics and Telecommunication Systems, e-mail: dimpson06@yandex.ru

³Соловьева Марина Андреевна, магистрант кафедры сейсмометрии и геоакустики, e-mail: marina-sol@yandex.ru

Solovieva Marina, Master's Degree Student of the Department of Seismometry and Geoacoustics, e-mail: marina-sol@yandex.ru

⁴Белоусов Олег Викторович, ведущий инженер лаборатории геологии оз. Байкал, e-mail: belouss@nm.ru

Belousov Oleg, Leading Engineer of the Laboratory of Lake Baikal Geology, e-mail: belouss@nm.ru

⁵Кононов Евгений Ефимович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории картографии, геоинформатики и дистанционных методов, e-mail: ekon@7395.ru

Kononov Evgeniy, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Cartography, Geoinformatics and Remote Sensing Methods, e-mail: ekon@7395.ru

⁶Хлыстов Олег Михайлович, исполняющий обязанности заведующего лабораторией геологии оз. Байкал, e-mail: oleg@lin.irk.ru

Khlystov Oleg, Acting Head of the Laboratory of Lake Baikal Geology, e-mail: oleg@lin.irk.ru

GAS HYDRATE RESOURCES ESTIMATION BY GEOPHYSICAL METHODS IN “KRASNY YAR” UNDERWATER GAS SEEP OF LAKE BAIKAL**A.V. Khabuev, D.A. Chensky, M.A. Solovieva, O.V. Belousov, E.E. Kononov, O.M. Khlystov**

Limnological Institute SB RAS, 3 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, 664033 Russia.

Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, 1 Ulan-Batorskaya St., Irkutsk, 664033 Russia.

Lake Baikal is the only fresh water lake in the world, where gas hydrates were found. Over the past 15 years, more than 30 places of their distribution were found and their main prospecting indicators were identified. Until quite recently, the only geophysical signs of the presence of gas hydrates in bottom sediments were represented by some positive relief forms on a bathymetric chart and the presence of acoustically hard reflectors in a gas channel on a seismogram. This paper determines one more prospecting indicator that is the anomalies in the backscattered signal obtained in a side-scan sonar (SSS) bottom topography survey.

In salt water conditions anomalies in the SSS backscattered signal may be related to several factors: the geomorphological features of relief; the presence in bottom sediments of authigenic carbonates, coarse-grained material or near-surface gas hydrates. Based on the study of the bathymetric chart and the results of geological sampling a paragenetic relationship has been found between these abnormalities and the presence of near-surface gas hydrates for the fresh water of lake Baikal.

It was suggested that the vertical distribution of gas hydrates is uniform up to their lower stability boundary (BSR). Having determined the areas of abnormal spots on the sonogram and BSR depth in seismic profiles the authors estimated the maximum possible resources of gas hydrates in the gas-saturated fluid seep zone in separate structures as the analogues of the ore body of a low-temperature hydrothermal deposit.

This is the first time when the relationship between the anomalies in side-scan sonar data and the presence of near-surface gas hydrates in the bottom sediments has been proved for the case of a freshwater reservoir. Measurements of the area of these anomalies and the assumption on the uniform distribution of gas hydrates in the sediment allowed to calculate the maximum possible resources of gas hydrate structures that will help to assess the total reserves of gas hydrates for the lake Baikal in the future.

Keywords: Lake Baikal; side-scan sonar; gas hydrates; resources.

Введение

Байкал – единственное пресноводное озеро в мире, где были найдены газовые гидраты – твердое соединение воды и газа, чаще всего метана. Впервые они были обнаружены в керне глубоководного бурения в 1997 г. на глубинах 121 и 161 м [2]. В 2000 г. в осадках грязевого вулкана «Маленький» впервые были найдены приповерхностные (менее 1 м от дна) газовые гидраты [1]. С этого времени на Байкале начались поиски новых мест их распространения вблизи поверхности дна. Для этого были разработаны поисковые признаки присутствия газовых гидратов: наличие в кернах грязевулканической брекчии и обильной газонасыщенности, отсутствие верхнего диатомового и окисленного слоев, а также присутствие акустически жестких рефлекторов в верхней части газового канала на сейсмопрофилях [5, 12]. Выделить явный геофизический признак наличия гидрата в поверхностном слое

зон разгрузки газонасыщенного флюида до последнего времени не удавалось, поиск газовых гидратов велся только опробованием гравитационными трубами в местах выхода пузырей газа, фиксируемых в виде аномалии «струи» (факела) на эхограммах. В шести таких местах поиск оказался успешным [6, 9, 12].

В морских условиях в придонной части приповерхностные газовые гидраты могут вызывать аномалии высокого значения при нормальной полярности в сигнале обратного рассеяния гидролокатора бокового обзора (ГБО). Такие аномалии чаще всего связаны с неровностями в рельефе дна. На ровном рельефе они связаны с наличием в приповерхностных осадках придонной части аутигенных карбонатов либо грубозернистого материала или, как уже было сказано выше, газовых гидратов [7, 8, 11, 14]. На Байкале похожие аномалии встречались часто при съемках дна ГБО, однако обусловлены они были главным

образом морфологическими особенностями рельефа.

В данной работе впервые для пресноводного водоема приводятся данные о взаимосвязи аномалий в сигнале обратного рассеяния с наличием приповерхностных газовых гидратов в донных осадках. Кроме того, проведен расчет максимально возможного объема газовых гидратов в изучаемых структурах разгрузки.

Методы исследований и полученные материалы

Материалы, использованные в статье, получены в ходе геофизических (1992, 2007, 2013–2015 гг.) и геологических (2012–2015 гг.) работ на оз. Байкал на научно-исследовательских судах «Балхаш» (1992 г.) и «Г.Ю. Верещагин» (2007, 2012–2015 гг.).

Исследуемый участок находится в северо-восточной части южной котловины

оз. Байкал, на западном склоне аван-дельты р. Селенги напротив м. Красный Яр. Он представляет собой пологий склон без ярко выраженных неровностей с углами наклона до $3,5^\circ$. Глубина дна плавно меняется с запада на восток от 730 до 780 м (рис. 1).

В 1992 г. вблизи данного района при помощи воздушной пушки были получены сейсмические данные метода отраженных волн в модификации общей глубинной точки. Данный метод имел следующие характеристики: горизонтальное разрешение – 300–400 м, вертикальное разрешение – 10 м, глубина проникновения в осадки – свыше 3 км. Это позволило оценить внутреннее строение района и выделить глубину залегания BSR*. Среднее значение для всего участка по результатам интерпретации составило 175 м.

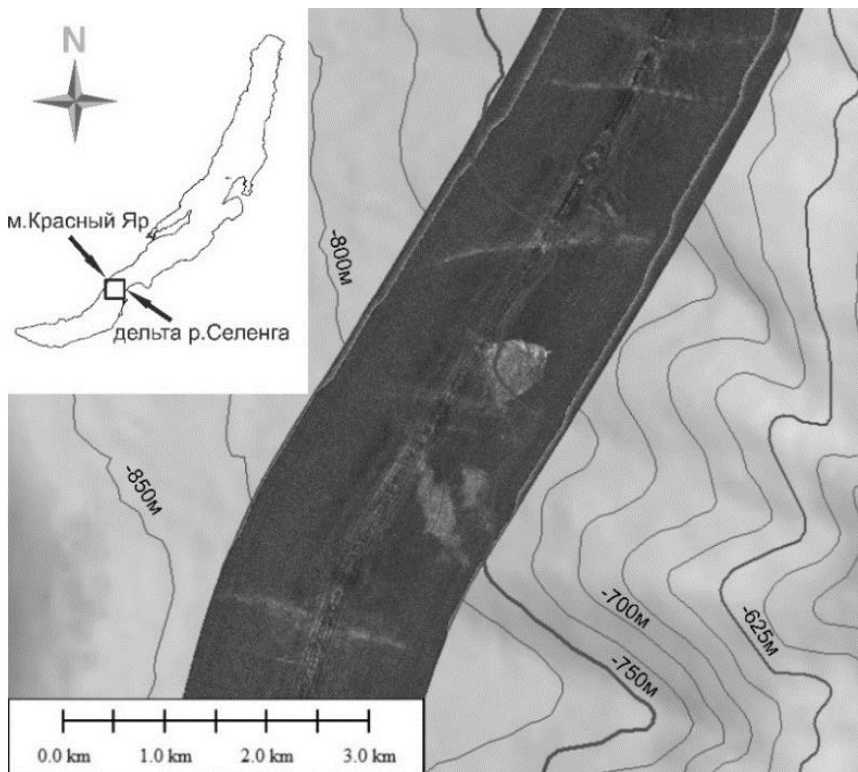


Рис. 1. Сонограмма гидролокатора бокового обзора на батиметрической карте (сечение изобат 25 м). Светлые пятна на сонограмме – аномалии сигнала

*BSR (Bottom Simulating Reflections) – отражение, повторяющее дно – линия, характеризующаяся следующими признаками: обратной полярностью по отношению к отражению от дна

и формой, примерно повторяющей рельеф дна. Является нижней границей залегания гидратного слоя.

Геофизическая съемка дна велась с использованием ГБО со встроенным профилографом, с привлечением оборудования и специалистов ВНИИ Океангеологии и группы «СОНИК» (2007 г.), а также ИРННТУ (2012–2015 гг.). Частота сигнала ГБО составляла 30 кГц, он способен вести регистрацию отраженного от дна сигнала на глубинах от 5 до 1600 м с точностью не хуже 0,5% от значения глубины. Сейсмоакустический профилограф с центральной частотой сигнала 6 кГц, встроенный совместно с ГБО в подводный буксируемый аппарат, позволял получать разрезы до 50 м глубины ниже дна с разрешением до 5 см. В результате обработки данных специализированными программами были получены сонограммы ГБО и сейсмограммы профилографа.

Геологическое опробование выполнялось с помощью прямоточных гравитационных стальных труб длиной от 3 до 5 м с наружным диаметром 127 мм и с пластиковым вкладышем внутренним диаметром 100 мм. При подъеме на борт

судна вкладыш разрезался вдоль для получения непрерывного геологического разреза донных отложений мощностью до 5 м.

В 2007 г. в ходе геофизической экспедиции на научно-исследовательском судне «Г.Ю. Верещагин» были получены сонограммы западного склона аванделты р. Селенги в южной котловине оз. Байкал. На одной из сонограмм напротив м. Красный Яр, где позже были отмечены выходы газа [10], обнаружено три участка с высоким сигналом обратного рассеяния, которые существенно не выделялись в рельефе.

Размеры участков составляли 425×500, 200×880 и 210×460 м, а их площади – 0,13, 0,11 и 0,06 км² соответственно. На сейсмоакустических разрезах через указанные участки просматривались аномалии в отраженном сигнале в виде «немых» областей среди согласно залегающих жестких рефлекторов, так называемые газовые каналы. Они проходили из нижних слоев донных осадков до поверхности дна озера (рис. 2).

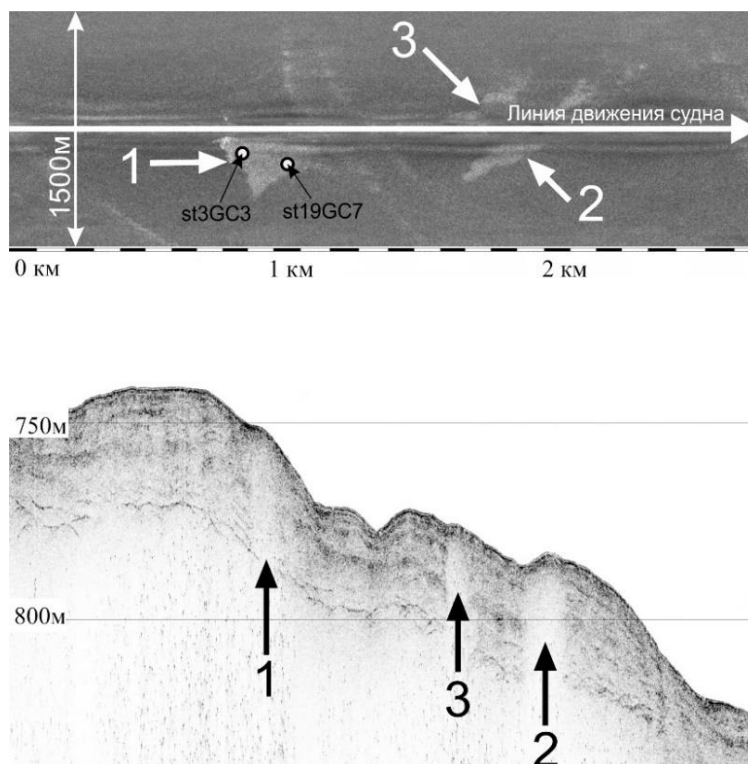


Рис. 2. Аномальные пятна (указаны белыми стрелками) на сонограмме (сверху) и газовые каналы (указаны черными стрелками) на сейсмограмме (снизу). Цифрами на схеме показаны структуры: 1 – «Красный Яр-1», 2 – «Красный Яр-2», 3 – «Красный Яр-3». Кружки – места отбора кернов на рис. 4, а (st3GC3) и б (st19GC7)

В 2012 г. в ходе геологического опробования донных осадков в пределах наибольшего по площади аномального пятна были обнаружены приповерхностные газовые гидраты. Данная структура получила название «Красный Яр-1». В 2013 г. были опробованы оставшиеся две структуры, названные «Красный Яр-2» и «Красный Яр-3», где также были получены керны с газовыми гидратами. Всего за 2012–2015 гг. было получено 36 кернов (18 внутри аномальных пятен и 18 вне их полигонов). Во всех структурах внутри пятен наблюдался сходный литологический состав донного осадка. Окисленный слой не наблюдался, а диатомовый алевро-пелитовый ил плавно переходил в алевритовую глину или вовсе отсутствовал. 16 из 18 этих кернов содержали газовые гидраты (рис. 3) преимущественно жильного, реже массивного типа (рис. 4), а их содержание варьируется от 6 до 44% и в среднем составляет 17%.

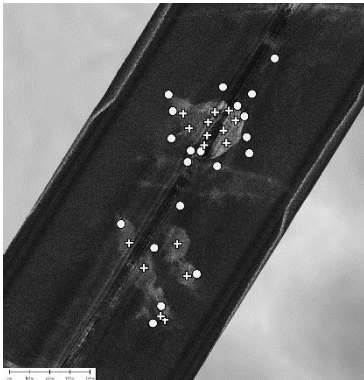


Рис. 3. Точки геологического отбора проб на сонограмме 2014 г.

Кружками показаны керны без газовых гидратов, крестами – с газовыми гидратами

Керны, отобранные вне пятен, характеризовались наличием поверхностного окисленного слоя в несколько миллиметров и отсутствием газовых гидратов. Грязевулканическая брекчия и карбонаты отсутствовали во всех колонках.

Данный тип разреза, форма структур и наличие разгрузки газа в виде «пузырей» позволили отнести эти структуры к сипам [9].

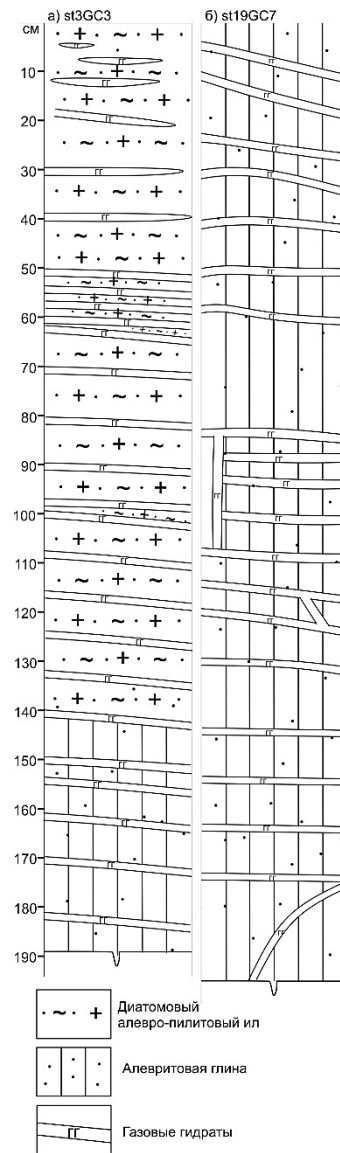


Рис. 4. Разрезы донных отложений. Жилы газовых гидратов в диатомовом алевро-пелитовом иле и алевритовой глине (а); только в алевритовой глине (б)

Обсуждение

Как было сказано выше, применительно к морским условиям аномалии в сигнале обратного рассеяния могут быть обусловлены геоморфологическими особенностями рельефа дна, а также наличием в приповерхностных осадках объектов с различным коэффициентом рассеяния (карбонаты, грубозернистый материал или газовые гидраты).

На батиметрической схеме (см. рис. 1) видно, что все три изучаемые структуры расположены на пологом (3–3,5°) склоне западного побережья озера без хорошо выраженных неровностей

рельефа. Это говорит о том, что данные аномалии не обусловлены геоморфологическими особенностями, а связаны, скорее всего, с наличием в этих аномалиях донного осадка, по своему составу отличающегося от окружающего его осадочного материала.

Карбонаты на поверхности дна в связи с низкой щелочностью вод (среднее содержание HCO_3^- составляет 66 мг/л [13]) в оз. Байкал образовываться не могут. Карбонаты родохрозитового и сидеритового составов были встречены лишь в кернах бурения скважины ВDP-98 на глубинах более 100 м ниже дна [3]. Вблизи же поверхности дна сидериты приурочены исключительно к грязевым вулканам [4].

Геологическое опробование показало, что донные осадки в аномальных пятнах содержат не грубозернистый материал, а газовые гидраты.

Таким образом, наличие газовых гидратов в местах аномалий рассеяния сигнала и их отсутствие вне таких мест говорит о взаимосвязи расположения приповерхностных газогидратных слоев и аномальных пятен на сонограммах.

Было выдвинуто предположение, что подобные структуры разгрузки могут быть рассмотрены как низкотемпературные гидротермальные месторождения, а распределение в них гидратов согласуется с распределением рудных полезных ископаемых жильного типа. Для оценки ресурсов гидрата в таком теле был проведен расчет максимально возможного объема гидратоносных осадков. Было предположено, что гидраты распределены, как и в керне, равномерно по всему «газовому каналу» и доходят до нижней своей границы стабильности (BSR). По разрезам кернов было оценено среднее процентное содержание гидрата в донных отложениях, и полученное значение (17%) распространено на весь

объем гидратоносной зоны сипа. По трем структурам получились следующие максимально возможные объемы ресурсов газовых гидратов: $6,32 \times 10^6$, $5,24 \times 10^6$ и $2,87 \times 10^6$ м³ соответственно, что в сумме составляет 14,43 млн м³.

Заключение

На основе геолого-геофизических данных определен дополнительный поисковый признак скоплений газовых гидратов вблизи поверхности дна в районе разгрузки газонасыщенного флюида на оз. Байкал в виде аномалии высокого значения в сигнале обратного рассеяния ГБО. Оконтуривание таких аномалий на сонограмме позволило определить площади структур разгрузки, что способствовало выполнению оценки максимально возможных ресурсов газовых гидратов в телах сипа и подводных газовых каналов. Данные расчеты в будущем помогут оценить общие запасы газовых гидратов для всей котловины оз. Байкал.

Авторы выражают благодарность руководителям проектов МНР-II (доктору Х. Минами, Технологический институт, г. Китами, Япония) и Class@Baikal (кандидату геолого-минералогических наук Г.Г. Ахманову, МГУ, г. Москва), в рамках которых были проведены полевые работы, а также кандидату физико-математических наук А.Г. Ченскому (ИРНИТУ, г. Иркутск) за техническое обеспечение геофизических работ.

Работы были выполнены при финансовой поддержке проектов Программы РАН № 23.7 и государственного задания ФАНО России № 0345-2014-0009. Анализ геолого-геофизических данных выполнен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-55-150005 НЦНИ а.

Библиографический список

1. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков озера Байкал / Я. Клеркс, Т.И. Земская, Т.В.

Матвеева [и др.] // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 6. С. 822–826.

2. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал / М.И. Кузьмин, Г.В. Калмычков, В.Ф. Гелетий [и др.] // Докл. РАН. 1998. Т. 362. № 4. С. 541–543.

3. Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках Байкала (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) / В. Антипин, Т. Афонина, В. Бычинский, А. Гвоздков, В. Гелетий, А. Горегляд, Г. Калмычков, М. Кузьмин [и др.] // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 1. С. 3–32.

4. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал / А.А. Крылов, О.М. Хлыстов, Т.И. Земская, Х. Минами, А. Хачикубо, Х. Шоджи, М. Кида, Т.П. Погодаева, Л. Наудтс, Д. Порт // Геохимия. 2008. № 10. С. 1051–1062.

5. Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 8. С. 979–981.

6. Хлыстов О.М., Кононов Е.Е., Хабуев А.В. Газогидратные скопления в донных осадках озера Байкал // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 249–255.

7. Acoustic investigation of cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea / I. Klaucke, H. Sahling, W. Weinrebe, V. Blinova, D. Burk, N. Lursmanashvili, G. Bohrmann // Mar. Geol. 2006. № 231. P. 51–67.

8. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr

paleodelta, NW Black Sea / L. Naudts, J. Greinert, Y. Artemov, S.E. Beaubien, C. Borowski, M. De Batist // Mar. Geol. 2008. № 251. P. 253–267.

9. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties / O. Khlystov, M. De Batist, H. Shoji, A. Hachikubo, S. Nishio, L. Naudts, J. Poort, A. Khabuev, O. Belousov, A. Manakov, G. Kalmychkov // Journal of Asian Earth Sciences. 2013. V. 62. № 1. P. 162–166.

10. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing / N.G. Granin, M.M. Makarov, K.M. Kucher, R.Y. Gnatovsky // Geo-Marine Letters. 2010. V. 30. № 3–4. P. 399–409.

11. Holland C.W., Weber T.C., Etiope G. Acoustic scattering from mud volcanoes and carbonate mounds // The Journal of the Acoustical Society of America. 2006. № 120. P. 3553–3565.

12. Location and characterization of gas hydrates in Lake Baikal / O. Khlystov, M. De Batist, S. Hitoshi, A. Khabuev, O. Belousov, G. Kalmychkov, A. Manakov, H. Minami, A. Hachikubo, S. Nishio, L. Naudts // Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates (ICGH8-2014). Beijing, 28 July – 1 August, 2014.

13. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal / K.K. Falkner, C.I. Measures, S.E. Herbelin, J.M. Edmond // Limnology and Oceanography. 1991. V. 36. P. 413–423.

14. Tracking California seafloor seeps with bathymetry, backscatter and ROVs / D. Orange, J. Yun, N. Maher, J. Barry, G. Greene // Cont. Shelf Res. 2002. № 22. P. 2273–2290.

References

1. Klerks Ia., Zemskaia T.I., Matveeva T.V. Gidraty metana v poverkhnostnom sloe glubokovodnykh osadkov ozera Baikal [Methane hydrates in the surface layer of deep-water sediments of Lake Baikal]. *Dokl. RAN – Proceedings of the*

Russian Academy of Sciences, 2003, vol. 393, no. 6, pp. 822–826.

2. Kuz'min M.I., Kalmychkov G.V., Geletii V.F. Pervaia nakhodka gazogidratov v osadochnoi tolshche ozera Baikal [The first discovery of gas hydrates in Lake

Baikal sediments]. *Dokl. RAN – Proceedings of the Russian Academy of Sciences*, 1998, vol. 362, no. 4, pp. 541–543.

3. Antipin V., Afonina T., Bychinskii V., Gvozdkov A., Geletii V., Goregliad A., Kalmychkov G., Kuz'min M. Pozdnekaino-zoiskaia paleoklimaticheskaia zapis' v osadkakh Baikala (po rezul'tatam issledovaniia 600-metrovogo kerna glubokogo bureniia) [Late Cenozoic paleoclimate records in Lake Baikal sediments (according to the results of studying a 600-meter drilling core)]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 3–32.

4. Krylov A.A., Khlystov O.M., Zemskaia T.I., Minami Kh., Khachikubo A., Shodzhi Kh., Kida M., Pogodaeva T.P., Naudts L., Port D. Formirovanie autigennykh karbonatov v griazevykh vulkanakh ozera Baikal [Authigenic carbonate formation in the mud volcanoes of Lake Baikal]. *Geokhimiia – Geochemistry*, 2008, no. 10, pp. 1051–1062.

5. Khlystov O.M. Novye nakhodki gazovykh gidratov v donnykh osadkakh ozera Bai-kal [New discoveries of gas hydrates in Lake Baikal bottom sediments]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 8, pp. 979–981.

6. Khlystov O.M., Kononov E.E., Khabuev A.V. Gazogidratnye skopleniia v donnykh osadkakh ozera Baikal [Gas hydrate accumulations in Lake Baikal bottom sediments]. *Izvestiia Sibirskogo otdeleniia Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii – Proceedings of Siberian Department of the Section of Earth Sciences Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*, 2011, vol. 39, no. 2, pp. 249–255.

7. Klaucke I., Sahling H., Weinrebe W., Blinova V., Burk D., Lursmanashvili N., Bohrmann G. Acoustic investigation of

cold seeps offshore Georgia, eastern Black Sea. *Mar. Geol.*, 2006, no. 231, pp. 51–67.

8. Naudts L., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S.E., Borowski C., De Batist M. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleodelta, NW Black Sea. *Mar. Geol.*, 2008, no. 251, pp. 253–267.

9. Khlystov O., De Batist M., Shoji H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts L., Poort J., Khabuev A., Belousov O., Manakov A., Kalmychkov G. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 162–166.

10. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing. *Geo-Marine Letters*, 2010, vol. 30, no. 3–4, pp. 399–409.

11. Holland C.W., Weber T.C., Etiope G. Acoustic scattering from mud volcanoes and carbonate mounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, no. 120, pp. 3553–3565.

12. Khlystov O., De Batist M., Hitoshi S., Khabuev A., Belousov O., Kalmychkov G., Manakov A., Minami H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts L. Location and characterization of gas hydrates in Lake Baikal. *Proceedings of the 8th International Conference on Gas Hydrates (ICGH8-2014)*. Beijing, 28 July – 1 August, 2014.

13. Falkner K.K., Measures C.I., Herbelin S.E., Edmond J.M. The major and minor element geochemistry of Lake Baikal. *Limnology and Oceanography*, 1991, vol. 36, pp. 413–423.

14. Orange D., Yun J., Maher N., Barry J., Greene G. Tracking California seafloor seeps with bathymetry, backscatter and ROVs. *Cont. Shelf Res.*, 2002, no. 22, pp. 2273–2290.

Статья поступила 24.12.2015 г.