

УДК: 553.98(282.256.341-751)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_48-55

В. А. Шахвердов, М. В. Шахвердова, О. В. Дронь (ВСЕГЕИ)

ПРОЯВЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ КАК УНИКАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ НА ДНЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Проведено комплексное геолого-геофизическое изучение нафтидопроявлений на дне озера Байкал. Установлено, что некоторые из них являются уникальными геологическими объектами. Предлагается рассматривать такие объекты в качестве объектов геологического наследия с приданием им официального охранного статуса.

Ключевые слова: озеро Байкал, геологические памятники, углеводороды.

V. A. Shakhverdov, M. V. Shakhverdova, O. V. Dron (VSEGEI)

HYDROCARBON SHOWS AS UNIQUE GEOLOGICAL TARGETS ON THE LAKE BAIKAL FLOOR

A comprehensive geoscientific study of naphthide occurrences on the bed of Lake Baikal has been carried out. It has been established that some of them are unique geological targets. It is proposed to consider such targets as geological heritage sites and grant them an official conservation status.

Keywords: Lake Baikal, geosites, hydrocarbons.

Для цитирования: Шахвердов В. А., Шахвердова М. В., Дронь О. В. Объекты миграции углеводородов как геологические памятники на дне озера Байкал // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 48–55. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_48-55.

Введение. Геологические памятники являются важнейшей частью природного наследия. Они представляют собой объекты, которые несут в себе разнообразную информацию о состоянии геологической среды и геологических процессах как уникальных, так и типичных. В связи с этим они имеют большое научно-образовательное, культурное и практическое значение и относятся к объектам общенационального достояния. Изучение и сохранение таких памятников природы является актуальной задачей научного сообщества.

Выявление, описание и учет геологических памятников на суше давно стало обязательным условием при проведении работ по геологической съемке различных масштабов. В разных государствах для геологических памятников, расположенных на суше, разрабатываются критерии их выделения и принципы классификации, а также применяются правовые нормативные документы, однако для уникальных объектов на дне морей и озер вообще нет понимания того, являются ли они памятниками. Исследования, которые ФГБУ «ВСЕГЕИ» проводит на озере Байкал, показывают, что на его дне существуют геологические объекты, являющиеся уникальными с точки зрения информации о геологических процессах и истории развития не только самого озера, но и нашей планеты в целом.

Объекты и методы. Центральная экологическая зона Байкальской природной территории приурочена к крупной нефтегазоносной структуре, о чем свидетельствуют многочисленные нафтидопроявления. Углеводородные системы представлены: горючим газом, нефтью, газовыми кристаллогидратами, растворенными в воде углеводородными газами, растворенными в воде донных осадков. Объектами исследований являлись проявления углеводородов на акватории озера Байкал (рис. 1). Практика наших работ на различных акваториях показала, что среди методов исследований есть группа, которая отличается высокой степенью достоверности оценки состояния объектов геологической среды. Оптимальный комплекс, применявшийся нами, включал геофизические методы (непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО), комплексное гидроакустическое профилирование); геологические методы (лито-геохимическое описание и опробование донного грунта, газо- и гидрогеохимические исследования донного грунта и придонных вод, экспресс-аналитические гидрогеохимические исследования, подводную фото- и телесъемку).

Результаты. Газовые грифоны. Выходы газа со дна озера, так называемые «газовые грифоны», являются наиболее многочисленными

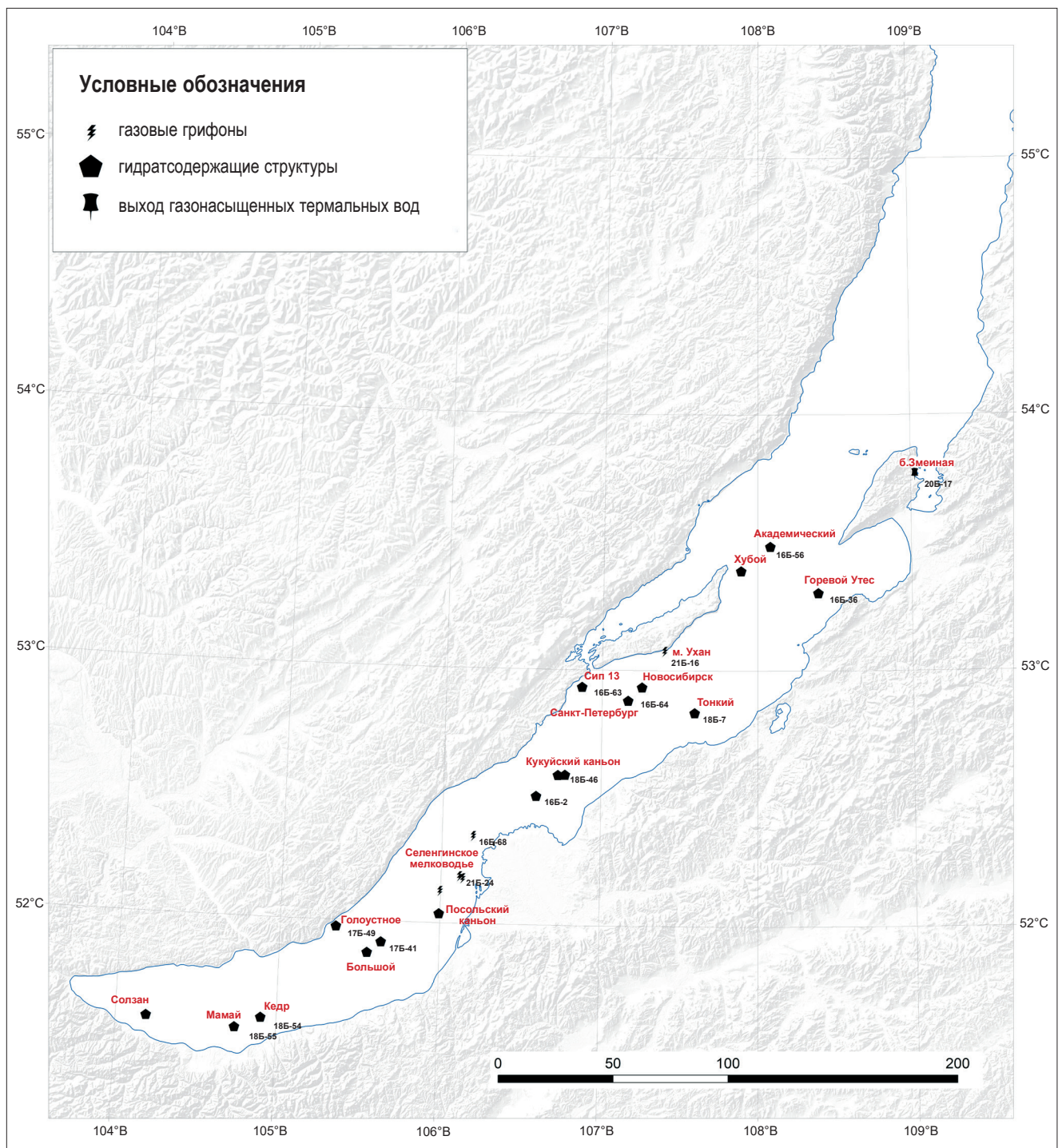


Рис. 1. Схема основных изученных уникальных геологических объектов на дне оз. Байкал

объектами миграции углеводородов [4]. В ходе проведенных комплексных геолого-геофизических работ на озере Байкал только в пределах Селенгинского мелководья было подтверждено и вновь выявлено более 100 газовых грифонов различной степени активности. Газ мигрирует к поверхности по проницаемым зонам, образуя стабильные в пространстве области газовых источников, часто в виде многочисленных газовых струй. Большинство объектов проявлены в толще воды в виде

акустических аномалий, которые фиксируются как в процессе проведения различных видов эхолотирования, так и гидролокации бокового обзора (рис. 2, 3). Рельеф поверхности дна в районе газовых грифонов осложнен уступами и воронками кратероподобной формы, размер которых может достигать 100 м при перепаде глубин до 20 м (рис. 3). Свободный газ характеризуется разнообразием состава. При среднем содержании метана в 53,6 об.% его концентрации

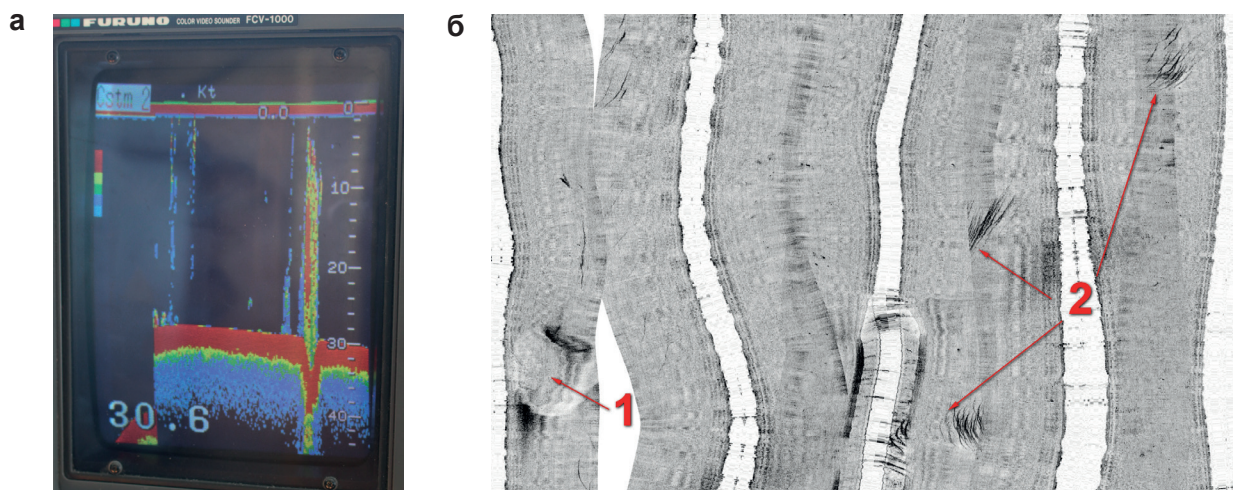


Рис. 2. Проявление выхода газа на судовом эхолоте (а) и фрагменте «мозаики» дна (б): участок Чаячий-1 (ГЛБО)
1 – воронка кратероподобной формы; 2 – следы газовых струй в водной толще

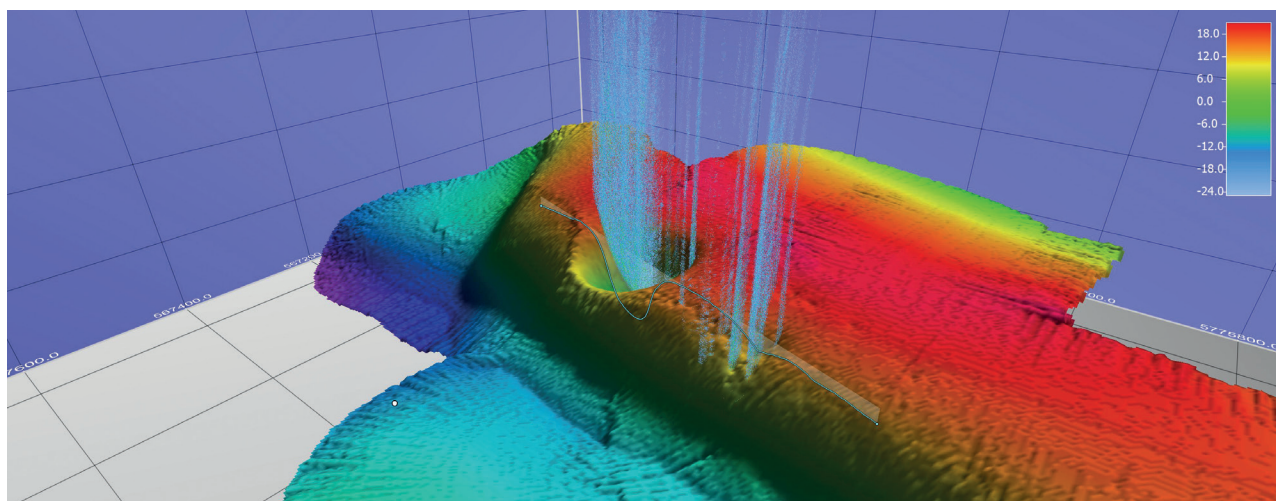


Рис. 3. Объемная модель рельефа поверхности дна и газового факела по данным многолучевого эхолотирования (Селенгинское мелководье)

колеблются от 0,1 до 95,1 об.%. При отсутствии метана основным газом в пробах является азот (до 98,4 об.%).

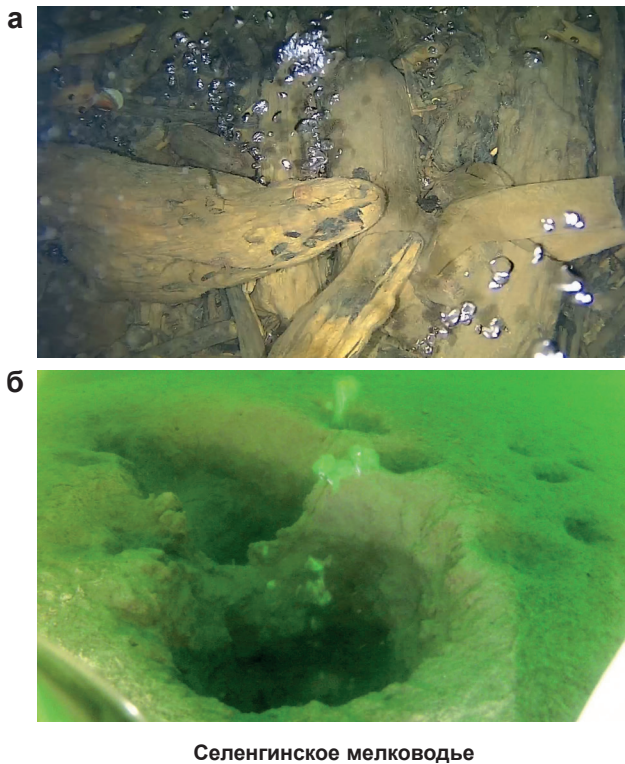
Для некоторых, наиболее активных и уникальных грифонов на глубинах, доступных для аппаратуры, проведена подводная фото- и видеосъемка, которая позволяет судить об интенсивности, характере этих объектов миграции углеводородов и особенностях донного ландшафта вблизи них.

При работах в 2015 г. на Селенгинском мелководье, на ст. 15Б-V10 были получены снимки грифона, самого активного из выходящих на поверхность воды. В месте наиболее активного выделения газа наблюдается обширная область «кипения» воды, которая сопровождается большим количеством более мелких выходов. На протяжении всех лет наблюдений (2015–2020 гг.) грифон сохраняет высокую активность. Струи газа на дне приурочены к обширной воронке, в которой

скапливается большое количество разнообразных обломков стволов и веток деревьев (рис. 4,а).

Из большого количества выходов газа, встреченных в пределах Селенгинского мелководья, следует отметить объект (ст. 16Б-68), на котором в 2016 г. была проведена видеосъемка струй газа, выходящих из зияющих кратероподобных воронок (рис. 4,б). При этом вокруг основного «кратера» присутствует большое количество более мелких «спящих» воронок, из которых газ в момент проведения съемки не выделялся. Подобные объекты также фиксировались и в 2015 г. В целом акваторию Селенгинского мелководья следует рассматривать как уникальную с точки зрения количества и активности газовых грифонов.

Интересные выходы газа встречены и в других частях озера. В Центральной котловине озера в районе мыса Ухан, у побережья о. Ольхон на небольших глубинах неоднократно наблюдались активные выходы газа (рис. 5,б). Там же в 2018 г.



Селенгинское мелководье

Рис. 4. Видеохарактеристика выходов газа и дна в районах проведения подводной фото- и видеосъемки

а – станция 21Б-24, глубина 40 м; б – станция 16Б-68, глубина 27 м

на глубинах около 100 м при выполнении эхолотирования судовым эхолотом зафиксирован мощный газовый грифон, практически выходящий на поверхность воды (рис. 5,а). Позднее, в результате проведения видеосъемки, выходы газа были прослежены от берега до глубины более 40 м (рис. 5,б). Часто они имеют пульсирующий характер с нерегулярной периодичностью пульсаций. Съемка показала, что выходы газа и грифон, вероятно, приурочены к единой зоне тектонических нарушений прослеживающихся от о. Ольхон на глубину.

В Северной котловине в бух. Змеиная Чивыркуйского залива (ст. 19Б-5, глубина 3 м) зафиксированы выходы газонасыщенных термальных вод (рис. 6). Характер источников пульсирующий. На дне наблюдается бурное развитие макрофитов различных видов. Вблизи выходов термальных вод на водорослях отмечается белесый налет, вероятно, связанный с их минерализацией. Исследования, проведенные в 2020 г. (ст. 20Б-17), показали аномальное значение температуры донного грунта, которая составляет на контакте дно-вода – 41,4 °С. При измеренной нами за период наблюдений средней температуре донных осадков на озере Байкал – 4,4 °С. При этом к забюю температура керна увеличивается и на глубине 43 см достигает 48,9 °С. Температура придонной воды здесь составила 18,4 °С. В то время как

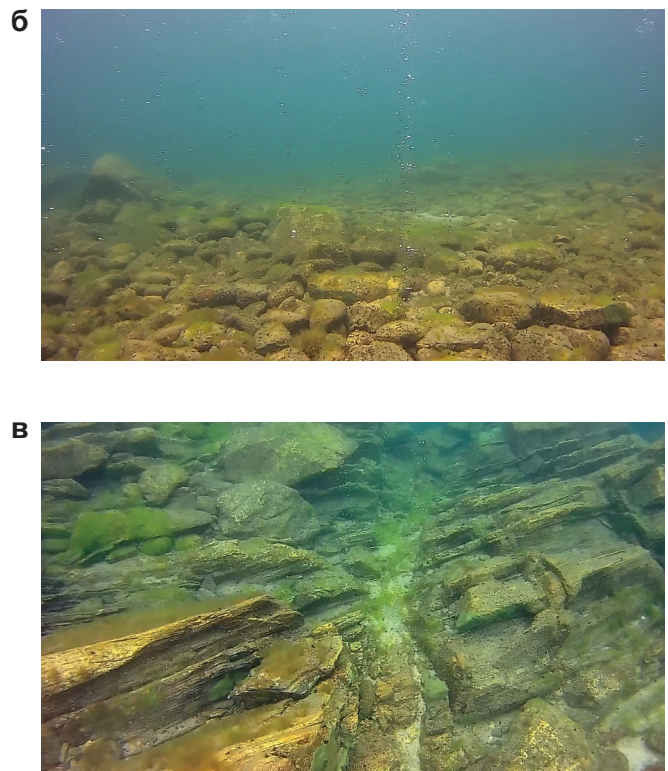
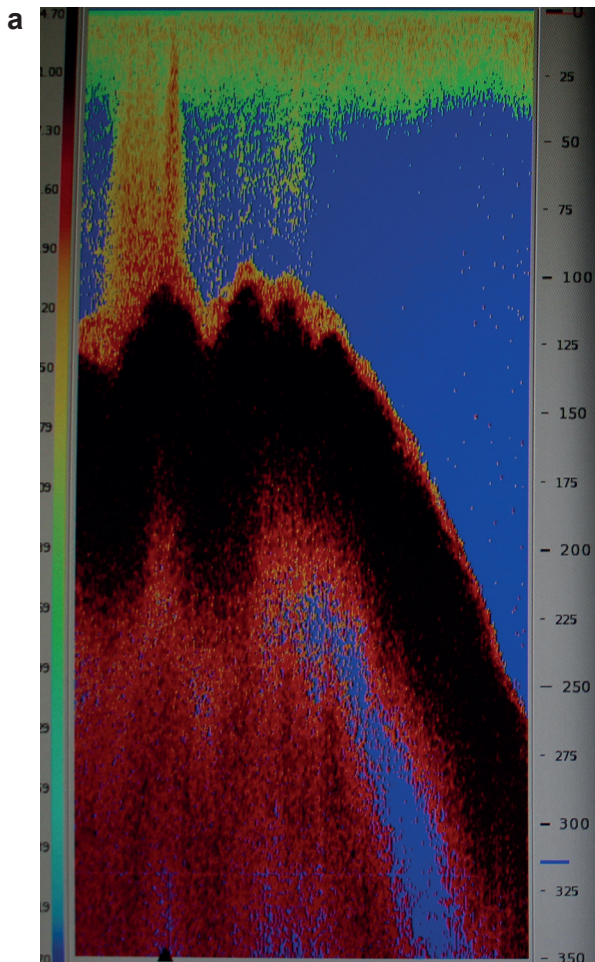


Рис. 5. Выходы газа в районе мыса Ухан

а – вид на судовом эхолоте; б – видеохарактеристика выходов газа со дна в районе ст. 21Б-16 на глубине 3 м; в – на глубине около 20 м

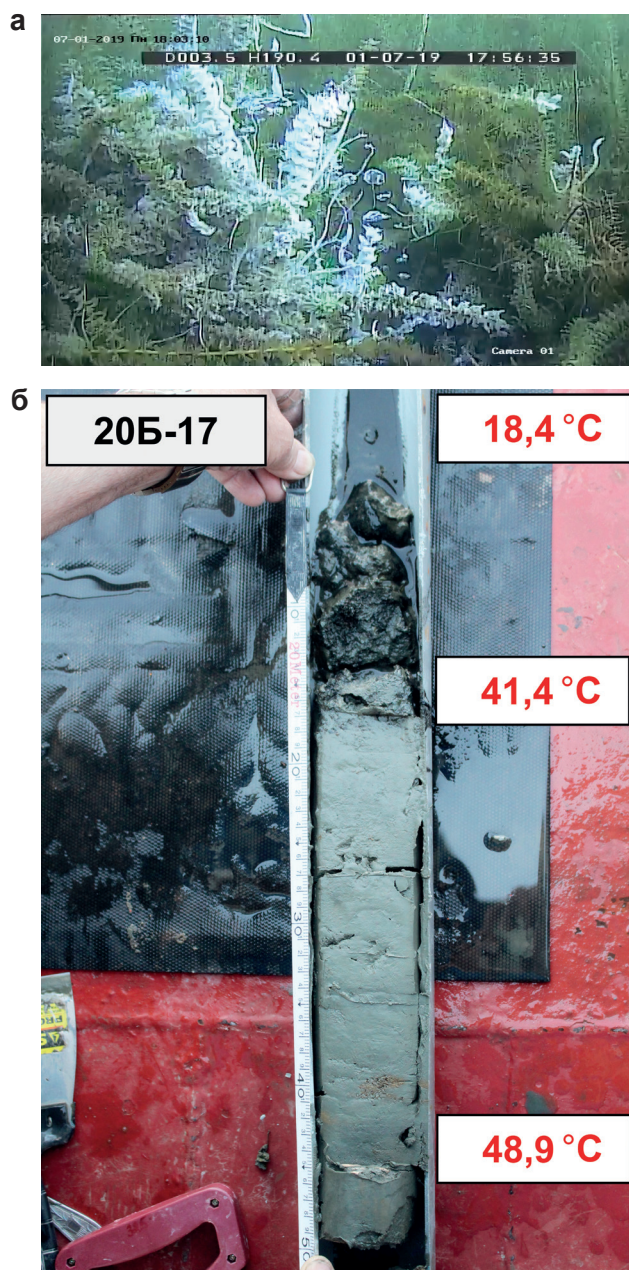


Рис. 6. Характеристика выходов термальных газонасыщенных вод в бух. Змеиная

а – видеохарактеристика (ст. 19Б-5); б – данные по измерениям температуры придонной воды и грунта (ст. 20Б-17) в бентосной трубке

измеренная нами средняя температура придонной воды – около 5,3 °С.

Наблюдения показали аномальные значения и других физико-химических показателей: окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и щелочно-кислотные свойства (pH) придонных вод, а также грунта. Придонные воды характеризуются средой, восстановительной по отношению к железу (Eh = 33 mv) и щелочными свойствами (pH = 8,57). Грунт также характеризуется высокой щелочностью (pH = 9,13), в то время как обычно водородный показатель грунта имеет слабокислый или нейтральный характер (в среднем – 7,25 единицы).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выходящие на дне термальные газонасыщенные воды имеют щелочные и восстановительные (глеевые) по отношению к железу свойства. В газовом составе преобладают азот и метан.

Газовые кристаллогидраты. Байкал является единственным в мире пресноводным озером, в котором встречены газовые кристаллогидраты. Они впервые были обнаружены в 1998 г. при проведении глубоководного бурения по проекту «Байкал-бурение» [3]. К настоящему времени открыто более 50 проявлений газовых гидратов [8]. Скопления газовых гидратов в донных отложениях имеют различную морфологию. Встречаются как массивные выделения (рис. 7,а) и прожилки, так и вкрапленные формы (рис. 7,б). При этом образования разной формы могут быть встречены в керне совместно. Как показали исследования газовых гидратов, выявленных в районе Кукуйского каньона [6], различные по форме их образования имеют и разный тип структуры кристаллического каркаса.

В ходе экспедиций 2016–2020 гг. нами были изучены проявления газовых кристаллогидратов, расположенные в Южной и Центральной котловинах озера Байкал (рис. 1). Их геологическая позиция позволяет предполагать наличие трех типов проявлений. В пределах районов юго-восточного склона

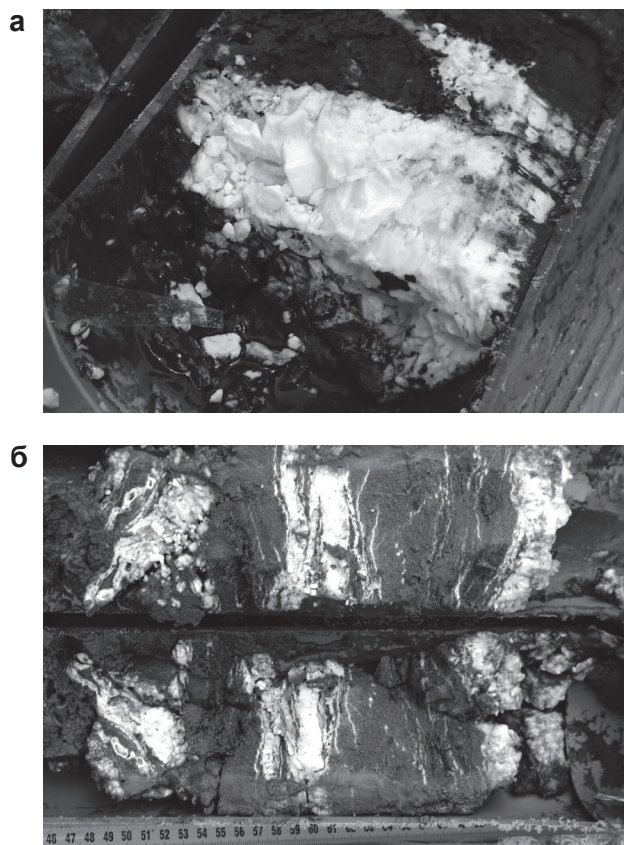


Рис. 7. Примеры различных морфологических форм выделения газовых гидратов (выделения белого цвета)

а – массивные выделения, Кукуйский каньон; б – прожилки и вкрапленные формы, проявление «Санкт-Петербург»

озера («Солзан», «Посольский каньон» и др.) основными являются эрозионные процессы, которые сопровождают формирование каньонов. На Академическом хребте выходы гидратов на поверхности дна («Хубой», «Академический хребет») связаны с тектоническими процессами в сочетании с эрозионными склоновыми процессами. Во впадинах в пределах абиссальных равнин («Санкт-Петербург», «Новосибирск», «Большой» и др.) ведущими являются тектонические процессы.

На 14 проявлениях были отобраны образцы гидратов, разные по морфологическим особенностям: массивные выделения, прожилковые и вкрапленные формы. Газохроматографический анализ газовой составляющей гидратов показал, что основным в ее составе является метан. Его доля в среднем составляет 90,7 об.% и достигает 96 об.%. В относительно небольшом количестве выявлена примесь этана, которая в среднем составляет 0,26 об.% (таблица, гидратный газ – тип 1). В то же время в пробах газа, взятых в районе нефтепроявления «Горевой Утес» и гидратопроявлений «Кедр» и «Мамай», концентрация этана существенна и достигает 4,5 об.% (таблица, гидратный газ – тип 2). Пробы газа, полученные в результате дегазации донного осадка, содержат меньшую концентрацию метана: от 5 до 46 об.%. Большую долю в них составляют азот, кислород и углекислый газ.

По данным публикаций [2], по соотношению стабильных изотопов углерода метана ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) на Байкале встречаются три его генетических типа: эндогенный, термогенный и биогенный. Биогенный (или бактериальный) метан имеет легкий изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} < -60\text{‰}$), в то время как эндогенный (или мантийный) – тяжелый ($\delta^{13}\text{C} > -30\text{‰}$). Термогенный метан занимает промежуточное положение между биогенным и эндогенным. В то же время, если предположить, что источником метана в гидратах является метан, образовавшийся в результате катогенетических преобразований органического вещества, захороненного в многокилометровой толще подбайкальских осадков, то весь метан должен быть термогенным и отличаться по изотопному составу от биогенного. Однако газ с низким содержанием этана, выделенный из гидратов (тип 1) и полученный в результате дегазации донных осадков (ТВД), а также свободный газ в пределах акватории озера, по изотопному составу существенно не

отличается от биогенного (таблица). Изотопный состав углерода метана, полученный в результате анализа образцов газового гидрата гидратопроявлений «Кедр» и «Мамай» (тип 2), характеризуется более тяжелым изотопным составом углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$ до $-44,2\text{‰}$) по сравнению с биогенным метаном.

Анализируя полученные данные изотопных исследований углерода метана из гидратов (тип 1), можно предположить, что в результате образования газового гидрата, а в дальнейшем его разрушения с образованием свободного газа осуществляется фракционирование изотопов углерода. В результате этого процесса метан, как имеющий меньшую теплоту образования (энтальпию плавления) относительно этана, высвобождающийся из газового гидрата, приобретает облегченный, близкий к бактериальному, изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ (от $-61,6$ до $-67,2\text{‰}$). В то время как в тех же образцах изотопный состав углерода в этане, как менее летучем гомологе, смещается в более тяжелую область и составляет $\delta^{13}\text{C}$ (от $-25,3$ до $-37,0\text{‰}$). Аналогичным образом можно объяснить механизм формирования гидратов кубической структуры II при распаде гидратов кубической структуры I и их одновременное присутствие в керне донных отложений на грязевом вулкане К-2 [6]. Таким образом, объяснение авторов этой публикации причин одновременного нахождения двух разных генетических типов углерода в одном объекте является весьма спорным, так же как и обсуждение механизма образования гидратов с разным типом структур, при котором «исходная газовая смесь постепенно обедняется тяжелыми углеводородами» [7; 9].

Выявление объектов, где изотопный состав углерода метана указывает на термогенное его происхождение (таблица, гидратный газ, тип 2), может свидетельствовать в пользу необходимости выделения двух генетических типов проявлений газовых кристаллогидратов. Важным является и то, что кроме метана в них в существенных концентрациях присутствуют и другие его гомологи (этан, пропан, бутан и др.), что, по нашему мнению, может быть связано с большей глубиной источника компонентов гидратов этого типа.

Выходы нефти. Исследования нефтегазоносности озера проводились еще в начале XIX в. экспедицией Петербургской академии наук (И. Г. Гмелин, 1833 г.), в ходе которой впервые были описаны выходы нефти вдоль восточного берега озера

Таблица

Характеристика газов по содержанию в них метана и этана, изотопному составу углерода

Тип газа	Концентрация метана, об. %		Средняя концентрация этана, об. %	CH ₄ d ¹³ C, ‰, PDB, min/max	C ₂ H ₆ d ¹³ C, ‰, PDB, min/max
	средняя	min/max			
Гидратный, тип 1	90,7	61,9/96,0	0,26	-61,6/-67,2	-25,3/-37,0
Гидратный, тип 2	90,2	88,1/95,7	2,32	-44,2/-51,4	-25,9/-29,6
После ТВД	22,9	5,0/46,1	0,05	-63,0/-63,2	-30,2
Свободный газ	53,6	0,1/95,1	0,06	10,7/-77,8	н/о

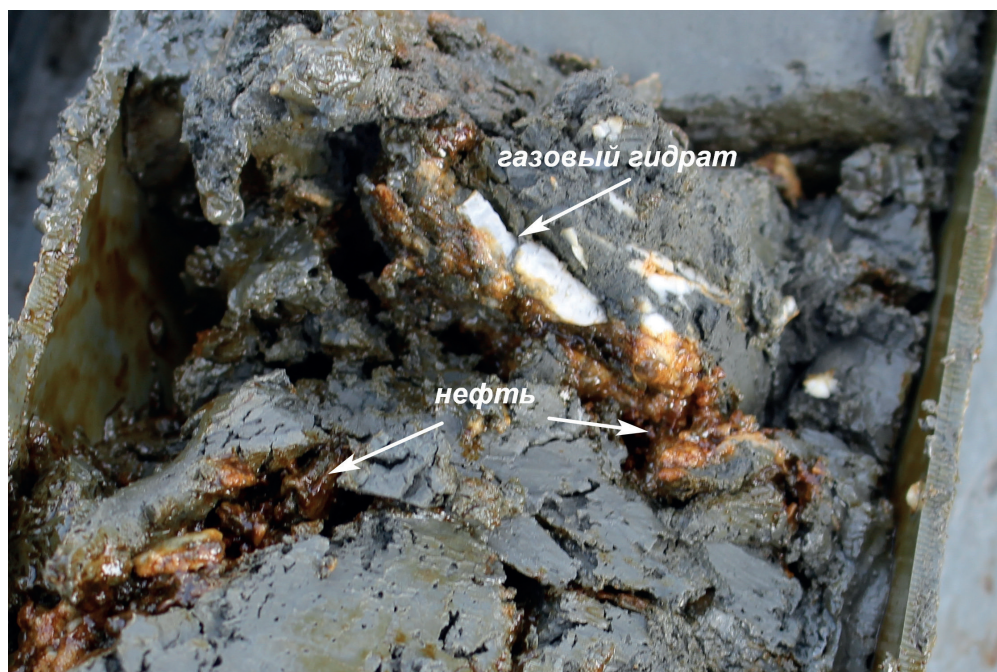


Рис. 8. Совместное нахождение газового гидрата и нефти в керне, ст. 16Б-36 (Горевой Утес)

Байкал. В настоящее время на открытой части акватории нефть фиксируется в виде пленок на поверхности воды, а в зимнее время скапливается подо льдом. В районе мыса Горевой Утес при погружении подводных аппаратов «Мир» (в сезоны 2008–2010 гг.) наблюдались битумные постройки, из которых высачивалась нефть [5].

Летом 2016 г. в ходе экспедиционных работ ФГБУ «ВСЕГЕИ» на НИС «Г. Ю. Верещагин» (ЛИН СО РАН) в районе мыса Горевой Утес с глубины 895 м был поднят донный грунт с нефтью (рис. 8). Проведенные хромато-масс-спектрометрические исследования образцов нефти показали глубокую степень ее биodeградации. Примечательно и очень важно, что при проведении донного опробования с помощью гравитационной трубы в керне, кроме нефти, были обнаружены и газовые гидраты (рис. 8). В составе газа гидратов, кроме метана, в значительных количествах присутствуют его гомологи: этан, пропан и бутан. Отмечено также присутствие алкенов и ароматических углеводородов, что существенно отличает данные газовые гидраты от газовых гидратов других проявлений, в которых нефть отсутствует. Изотопный состав углерода метана газовых гидратов из проявления Горевой Утес ($\delta^{13}\text{C} -44,3\text{‰}$) свидетельствует о глубинном его источнике.

Заключение. Одним из важнейших критериев для выявления объектов геологического наследия является их научная значимость. Под этим М. С. Вдовец [1] подразумевает в том числе уникальность или типичность объекта, активное протекание современных геологических процессов и их масштабность. Всем этим критериям описанные объекты проявления углеводородов на Бай-

кале отвечают в полной мере. На этом основании их отнесение к геологическим памятникам было бы вполне обоснованным и, мы уверены, целесообразным решением. В связи с этим закономерно может быть поставлен вопрос о выявлении, описании, учете и сохранении геологических памятников на дне озера, а также включении их в список объектов геологического наследия и придании им официального охранного статуса. К таковым, кроме уже описанных выше объектов, могут быть отнесены уникальные и типовые подводные ландшафты, геоморфологические, седиментационные, фациально-литологические обстановки и другие геологические объекты на дне озера. Работы должны быть продолжены с целью разработки структуры и составления базы выявленных геологических памятников на дне озера Байкал, для чего необходимо проведение отдельных тематических исследований (с дальнейшим оформлением созданной базы как объекта интеллектуальной собственности). В результате этих работ необходимо также разработать предложения по определению статуса, зон охраны и возможностей рекреационного использования уникальных геологических объектов на дне озер и морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вдовец М. С. Современное состояние изучения и охраны геологического наследия. Проблемы изучения и охраны объектов геологического наследия России // Материалы Рабочего совещания Российской группы ProGEO. – Миасс, 2007. – С. 12–16.
2. Генетические типы метана озера Байкал / Г. В. Калмычков, А. В. Егоров, М. И. Кузьмин, О. М. Хлыстов // Докл. РАН. – 2006. – Т. 411, № 5. – С. 672–675.

3. 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.
4. Пузырьковые выходы газа из донных отложений / М. М. Макаров, Д. А. Лопаткин, Н. Г. Гранин и др. // Экологический атлас бассейна оз. Байкал. – 2014.
5. Тулохонов А. К. «Миры» байкальских глубин: итоги и размышления / отв. ред. Н. А. Грачев // Байкальский институт природопользования СО РАН. – Улан-Удэ : ЭКОС, 2010. – 80 с.
6. Физико-химическая модель образования газовых гидратов с различным структурным типом на грязевом вулкане К-2 (Кукуйский каньон, озеро Байкал) / А. Ю. Манакон, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, А. Г. Огиенко // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 4. – С. 615–625.
7. Dual hydrate structures SI and SII at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico / S. A. Klapp, M. M. Murshed, T. Pape, G. Bohrmann, P. G. Brewer, W. F. Kuhs // Proceedings of the 7-th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011). – Edinburgh, Scotland, United Kingdom. – 2011.
8. Gas hydrates in Lake Baikal / О. М. Хлыстов, А. В. Кhabuev, Н. Minami, А. Hachikubo, А. А. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – No. 1. – Pp. 66–70.
9. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico / S. A. Klapp, M. M. Murshed, T. Pape, H. Klein, G. P. Bohrmann, G. Brewer, W. F. Kuhs // Earth and Planetary Science Letters. – 2010. – Vol. 299, no. 1–2. – Pp. 207–217.
- ya i okhrany ob'ektov geologicheskogo naslediya Rossii. *Materialy Rabocheho soveshchaniya Rossiyskoy gruppy ProGEO*, Miass, 2007, pp. 12–16.
2. Kalmychkov G. V., Egorov A. V., Kuz'min M. I. et al. Geneticheskie tipy metana ozera Baykal. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2006, vol. 411, no. 5, pp. 672–675.
3. Kuz'min M. I., Kalmychkov G. V., Geletiy V. F. et al. Pervaya nakhodka gazogidratov v osadochnoy tolshche ozera Baykal. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 1998, vol. 362, no. 4, pp. 541–543.
4. Makarov M. M., Lopatkin D. A., Granin N. G. et al. Puzyr'kovye vykhody gaza iz donnykh otlozheniy. *Ekologicheskii atlas basseyna oz. Baykal*, 2014.
5. Tulokhonov A. K. «Miry» baykal'skikh glubin: itogi i razmyshleniya. Ed.: N. A. Grachev. *Baykal'skiy institut prirodopol'zovaniya SO RAN*. Ulan-Ude, EKOS, 2010, 80 p.
6. Manakov A. Yu., Khlystov O. M., Khachikubo A. et al. Fiziko-khimicheskaya model' obrazovaniya gazovykh gidratov s razlichnym strukturnym tipom na gryazevom vulkane K-2 (Kukuyskiy kan'on, ozero Baykal). *Geologiya i geofizika*, 2013, vol. 54, no. 4, pp. 615–625.
7. Klapp S. A., Murshed M. M., Pape T. et al. Dual hydrate structures SI and SII at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico. *Proceedings of the 7-th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*. Edinburgh, Scotland, United Kingdom, 2011.
8. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H. et al. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, no. 1, pp. 66–70.
9. Klapp S. A., Murshed M. M., Pape T. et al. Mixed gas hydrate structures at the Chapopote Knoll, southern Gulf of Mexico. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 299, no. 1–2, pp. 207–217.

REFERENCES

1. Vdovets M. S. Sovremennoe sostoyanie izucheniya i okhrany geologicheskogo naslediya. Problemy izucheni-

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Шахвердова Марина Васильевна – инженер 2-й категории, ВСЕГЕИ. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

Дронь Олег Владимирович – инженер 1-й категории, ВСЕГЕИ. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Shakhverdova Marina Vasilevna – Engineer, VSEGEI. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

Dron Oleg Vladimirovich – Engineer, VSEGEI. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.