

В. А. ШАХВЕРДОВ, Ю. П. КРОПАЧЕВ, А. А. МОСКОВЦЕВ,
О. В. ДРОНЬ (ВСЕГЕИ)

Новые данные о причинах формирования кольцевых структур на льду озера Байкал

Проанализирована позиция кольцевых структур на льду озера Байкал относительно объектов миграции углеводородов. Полученные данные комплексных геолого-гидрогеохимических исследований и газовой съемки показали отсутствие прямой связи кольцевых структур с проявлениями гидратов и газовыми грифонами. Геолого-геофизическое изучение разреза донных отложений в районах акватории наиболее частого обнаружения кольцевых структур показало, что непосредственно под ними в разрезе донных отложений располагаются тектонические нарушения, к которым приурочены проницаемые каналы. Последние являются каналами глубинной разгрузки низкотемпературных гидротермальных растворов в водную толщу, что может быть причиной возникновения антициклонических кольцевых течений и, как следствие, кольцевых структур на льду озера.

Ключевые слова: Байкал, углеводороды, кольцевые структуры на льду.

V. A. SHAKHVERDOV, YU. P. KROPACHEV, A. A. MOSKOVITSEV,
O. V. DRON (VSEGEI)

New data on the reasons for the ring structure formation on the ice of Lake Baikal

The position of ring structures on the ice of Lake Baikal relative to hydrocarbon migration objects was analyzed. The data obtained from geological and hydrogeochemical studies and gas surveys show that there is no direct relationship between ring structures and hydrate shows and gas seepage. Geological and geophysical study of the sub-bottom profile in the water area of the most frequent occurrence of the ring structures show that tectonic faults, to which permeable channels are confined, are located directly below them. The latter are the channels for deep discharge of low-temperature hydrothermal solutions into the water column, which can be the cause of anticyclonic ring currents, and, as a result, of ring structures on the ice of the lake.

Keywords: Baikal, hydrocarbon, ring structures on ice.

Для цитирования: Шахвердов В. А. Новые данные о причинах формирования кольцевых структур на льду озера Байкал / В. А. Шахвердов, Ю. П. Кропачев, А. А. Московцев, О. В. Дронь // Региональная геология и металлогения. — 2021. — № 85. — С. 21–30.

Введение. Котловина оз. Байкал представляет собой часть Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), крупнейшей на территории России и второй по размерам внутриконтинентальной рифтовой системой в мире после Восточно-Африканской. БРЗ обладает сложным геологическим строением, характеризуется аномальным состоянием глубинного вещества и высокой сейсмической активностью. Озеро Байкал является единственным в мире пресноводным водоемом, где в донных осадках обнаружены скопления газовых кристаллогидратов. И в 1996 г. оно по праву было включено в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Одно из достаточно необычных явлений на озере — образование на поверхности льда обширных многокилометровых кольцевых структур, которые возникают в разных частях озера и видны на космических снимках. В последнее время именно с широкой доступностью материалов дистанционных наблюдений и связано обнаружение этих образований. Кольцевые структуры

имеют близкую к окружности форму и достигают 6–9 км в диаметре. Обычно «кольца» становятся видимыми в начале апреля и исчезают к моменту разрушения сплошного ледового покрова. Как правило, они неоднократно появляются в одних и тех же районах акватории оз. Байкал. Так, в районе мыса Крестовский кольцевые структуры фиксируются практически ежегодно с начала наблюдений. Многие годы «кольца» отмечались в районе мыса Нижнее Изголовье у п-ова Святой Нос, к востоку от о. Ольхон, в заливе Култук и других местах [11; 12]. Интерес к этим объектам вызван многообразием гипотез их происхождения, среди которых встречаются и весьма экзотические.

Описание структур такого типа и попытки объяснения их происхождения приводятся в целом ряде публикаций. Здесь сошлемся на работу А. В. Кураева с коллегами, в которой дано определение понятию «ледовое кольцо», приведен наиболее полный перечень выявленных

кольцевых структур на оз. Байкал с их пространственной привязкой и рассмотрен ряд гипотез их формирования [11]. На некоторых из них мы остановимся ниже, обратив внимание на основные наиболее существенные противоречия с точки зрения новых данных, которые получены нами в ходе комплексных геолого-геофизических исследований на акватории оз. Байкал.

Основные модели формирования «ледовых колец». Центральная экологическая зона Байкальской природной территории приурочена к крупной нефтегазоносной структуре, о чем свидетельствуют многочисленные нафтидопроявления [4]. Углеводородные системы представлены горючим газом, нефтью, газовыми кристаллогидратами, растворенными в воде углеводородными газами, углеводородными газами донных осадков. Поэтому вопрос участия в формировании кольцевых структур процессов, связанных с миграцией углеводородов, представляется одним из наиболее важных.

В литературе приводятся разные причины возникновения «ледовых колец», но большинство исследователей сходятся во мнении, что одна из основных причин их формирования – изменения в толщине и структуре (неоднородности) ледового покрова, приводящие к неравномерной его деградации в период таяния. Именно в связи с этим процессом «ледовые кольца» становятся видимыми на космических снимках в весенний период. В то же время не существует единого мнения о причинах, приводящих к изменению состояния ледового покрова. По одной из концепций [5; 6; 8] предполагается, что возникновение кольцевых структур связано с антициклоническими круговыми течениями, которые генерируются в результате локального подъема глубинных вод. Наличие таких течений подтверждается результатами полевых гидрологических исследований водной толщи в районах «ледовых колец» и посредством математического моделирования. При этом было показано, что подледная вода в центре «ледового кольца» имеет температуру на 0,5 °C теплее и меньшую минерализацию, чем за пределами структуры. Как предполагают авторы этих статей, прорыв глубинных вод – следствие всплытия и разрушения газового гидрата.

Другая модель формирования кольцевых структур предложена В. К. Балхановым с коллегами [1; 2] и заключается в том, что в результате выброса со дна озера теплого природного газа вокруг него в толще воды образуется конвекция в виде тороидальной фигуры вращения. Авторы делают вывод о линейной связи размера тороидальных фигур с глубиной выброса газа [2] и приводят теоретическое обоснование условиям возникновения конвекции радиальной направленности, в отличие от антициклонического вихря [6], который имеет осевую конвекцию. Сразу следует отметить, что анализ данных о соотношении глубин Байкала в местах образования «ледовых колец» и их диаметра показывает отсутствие

значимой линейной зависимости между этими характеристиками (рис. 1). Отсутствие такой зависимости хорошо видно и на космическом снимке (рис. 2), где одновременно зафиксированы две кольцевые структуры. Первая, на севере Малого моря при глубине озера не более 400 м, обладает диаметром близким к 10 км. Диаметр второй, в районе мыса Нижнее Изголовье, около 5 км. При этом глубина озера здесь может достигать 1450 м и более.

Не будем здесь обсуждать, какая из моделей более достоверна, так как это не является целью нашей статьи. Отметим только, что в ходе полевых работ, которые проводились в районе мыса Нижнее Изголовье, было зафиксировано закономерное изменение толщины ледового покрова и температуры подледной воды в пределах кольцевой структуры, а также наличие течения по ее периферии. Кроме того, анализ ночных космических снимков в тепловом диапазоне показал существование тепловой аномалии в районе мыса еще до начала образования кольцевой структуры на поверхности льда, что, по нашему мнению, может указывать на достаточно продолжительный процесс этого явления. В то же время обе концепции рассматривают процесс формирования конвекционного течения в большей степени как стихийный, а не закономерный и протяженный.

Таким образом, отличаясь друг от друга моделями образования собственно конвекционных течений, эти концепции сходятся в том, что причина формирования кольцевых структур – процессы, в той или иной степени связанные с газовыми гидратами или выходами газа со дна. Однако проведенный нами анализ пространственного положения кольцевых структур на акватории оз. Байкал относительно обнаруженных к настоящему времени проявлений газовых гидратов [10] на поверхности дна и подтвержденных выходов газа (грифонов) показывает, что практически все кольцевые структуры находятся вне пределов таких объектов. Это позволяет сделать вывод об отсутствии прямой связи с ними кольцевых структур. Таким образом, концепция образования «ледовых колец» в результате подъема глубинных вод после разложения газового гидрата или выброса метана и вследствие этого появления как антициклонических кольцевых, так и тороидальных течений не подтверждается. В том числе и потому, что на акватории Северной котловины оз. Байкал, где также были встречены кольцевые структуры на льду, нами не были обнаружены ни газовые гидраты в донных осадках, ни массовые выделения газа со дна озера.

К отрицанию связи «ледовых колец» с проявлениями гидратов и выходами газа склоняется и А. В. Кураев [11], который предлагает другой механизм формирования кольцевых структур. По его мнению, это поверхностные проявления подледных антициклонических вихрей, которые существуют до начала формирования «колец» и не исчезают во время его образования и разветвления. При этом особенности водной толщи

под «ледовыми кольцами» определяются наличием линзовидной структуры полей температуры, удельной электропроводности и плотности воды. А. В. Кураев отмечает и еще одну особенность вихрей – наличие более теплой и минерализованной воды в его ядре по сравнению с его периферией. При этом он считает, что линзовидные вихри (структура водной толщи) не являются следствием прорыва более теплых и менее минерализованных вод из более глубоких областей озера, а результат собственно вихревого движения.

Однако, по нашему мнению, данный механизм формирования кольцевых структур не объясняет одну из главных их особенностей – приуроченность (или частое появление) к одним и тем же районам акватории озера. Предложенное сочетание нескольких недостаточно определенных «местных условий: свал глубин, форма береговой линии, поле ветра и речной сток» [11] в качестве причин образования антициклонических вихрей не позволяет на это рассчитывать, так как благоприятное сочетание таких условий и многократная их повторяемость в одних и тех же частях акватории маловероятна. Скорее всего, в этой модели мы будем иметь формирование малоустойчивых нестационарных вихрей, причем не только антициклонической, но и циклонической

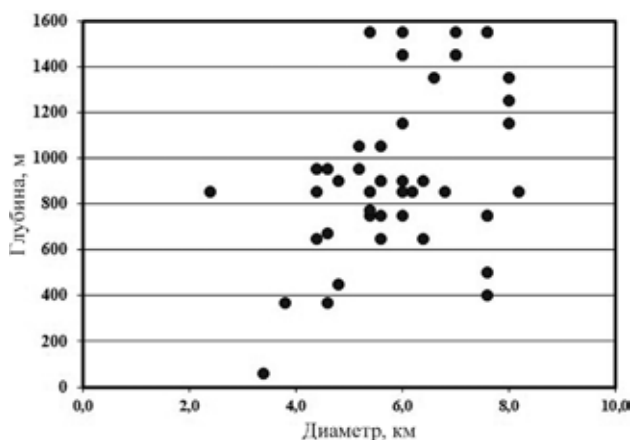


Рис. 1. Зависимость диаметра кольцевых структур от глубины акватории в местах их формирования

направленности. Тем более, если предполагать влияние на их формирование синоптических изменений атмосферного давления, как это полагает в одной из своих публикаций А. В. Кураев [11], что не согласуется с полученными на Байкале полевыми наблюдениями, которые демонстрируют наличие конвекции только антициклонической направленности.

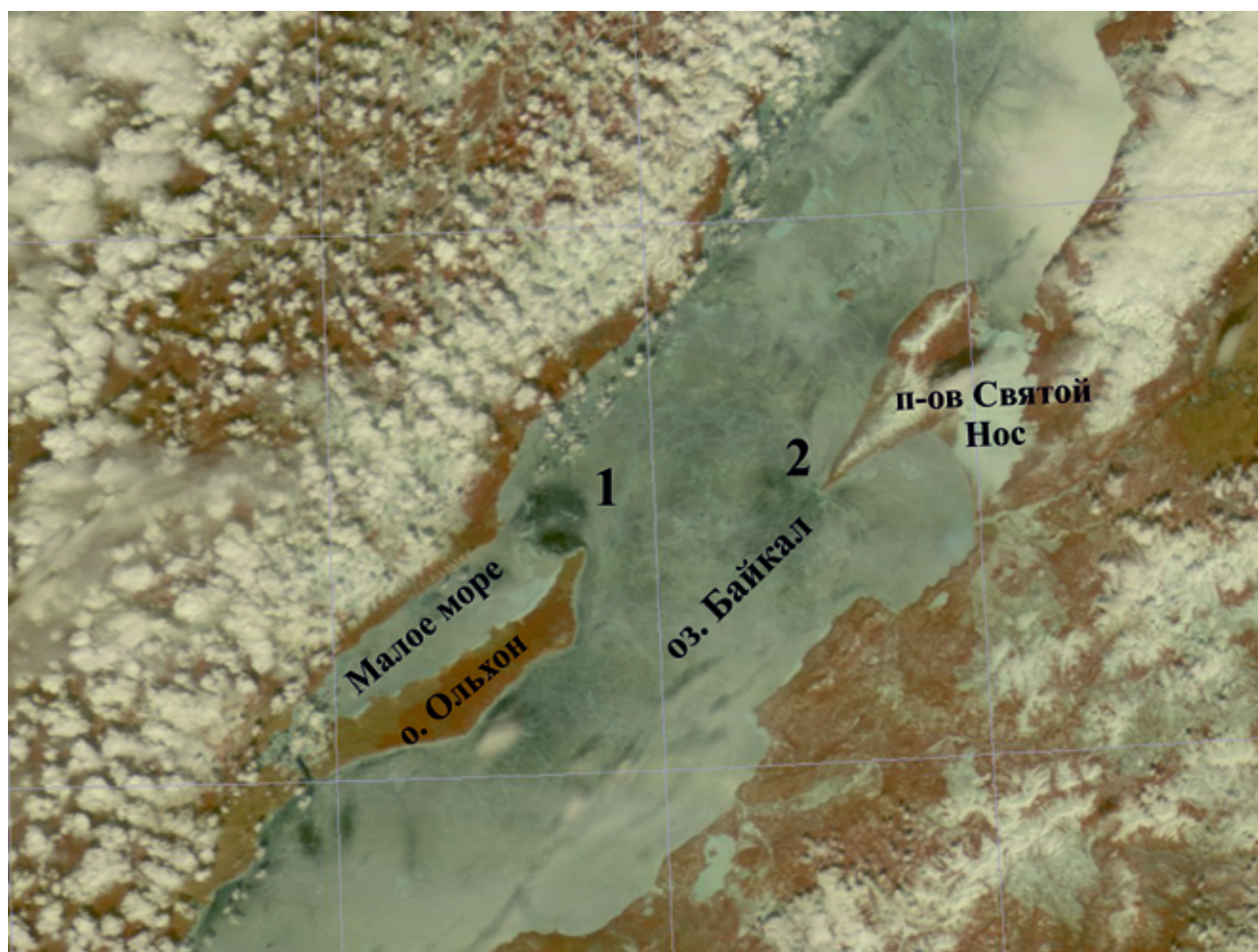


Рис. 2. Кольцевые структуры на льду озера Байкал: 1 – север Малого моря, 2 – мыс Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос (космический снимок от 22 апреля 2019 г., www.sputnik.irk.ru)

Ни одна из рассмотренных выше концепций не отрицает присутствия под «ледовыми кольцами» конвекционных вихревых течений. В основном отличия связаны с механизмом их формирования и гидрологическими характеристиками водной толщи (температурой, минерализацией, плотностью и др.), которые были получены в ходе полевых наблюдений конвекционных течений. По нашему мнению, эти отличия, возможно, могут быть связаны с тем, что полевые измерения проводились на разных этапах развития этих течений.

Модель возникновения кольцевых структур в результате процессов «самоорганизации в симметричной пластине льда» [3] при участии энергии солнечного излучения нами не рассматривалась, так как имеет сугубо теоретический, а не практический характер и противоречит целому ряду реально наблюдаемых фактов.

Таким образом, анализ различных моделей формирования кольцевых структур на поверхности ледового покрова оз. Байкал показал, что ответ на главный вопрос о первопричинах их образования так и остается открытым. Несмотря на детальность гидрологических исследований, ни в одной из представленных моделей их авторы не рассматривают особенности строения геологического разреза донных отложений в районах появления кольцевых структур. В результате собственно геологические процессы в причинах образования «ледовых колец» не учитываются.

Методы исследований и полученные результаты. Геолого-геофизические работы, проведенные нами с 2015 по 2019 г. на акватории оз. Байкал, восполняют этот пробел. В основе этих исследований лежат методы комплексного геологического картирования, которые подразумевают сочетание как геологических и геохимических, так и геофизических методов. Только такой подход позволяет оценить общие закономерности проявления исследуемых геологических процессов.

Наблюдения были проведены на 328 станциях. Отбор донного грунта осуществлялся с помощью ковша бокс-корера и бентосной герметичной трубки. Пробы придонной воды отбирались из трубки, а в случае отсутствия воды в системах отбора грунта — с помощью батометра. Кроме отбора донного грунта и придонной воды для комплексных аналитических исследований, измерения быстро меняющихся физико-химических показателей (Eh, pH и температуры) проводилась дегазация проб с целью получения водорастворенных и остаточных газов донных отложений.

В результате было изучено 12 основных проявлений газовых кристаллогидратов, обнаружено или подтверждено положение большинства мест разгрузки газов (газовых грифонов). Для составления различных схем (гидрохимических аномалий, распределения газов, температурных аномалий в придонном слое и др.) использовано более 260 определений микрокомпонентного состава придонных вод, около 430 анализов состава водорастворенных газов в придонных

водах и остаточных газов донных отложений. Выполнено более 1500 км сейсмоакустических профилей (НСП).

При проведении НСП для возбуждения сейсмического импульса нами использовался электроискровой источник типа спаркер. Устойчивость его работе в пресных водах оз. Байкал обеспечивал специальный электродный модуль, заполненный соленой водой. Кроме того, был выбран оптимальный частотный диапазон зондирующих импульсов, улучшена разрешающая способность исследований до 2–3 м, что позволило провести профилирование на всех глубинах водного слоя Байкала и получить отражающие границы от верхней части донных осадков с максимальной мощностью до 400 м. Ранее применявшиеся технические средства не позволяли достигать подобных результатов. С помощью НСП оценивалось состояние структурных сеймостратиграфических и сейсмолитологических параметров верхней части геологического разреза дна. Установлены нарушения геологической среды, активизированные подходящие к поверхности дна разрывные нарушения, гравитационные смещения блоков пород, нарушения характеристических мощностей отложений, структурные нарушения и т. п.

Как уже упоминалось выше, анализ расположения «ледовых колец» на акватории озера относительно объектов миграции углеводородов (проявлений газовых кристаллогидратов и газовых грифонов) не подтвердил связь кольцевых структур с такими объектами (рис. 3).

Еще одной важной характеристикой, которая может способствовать пониманию роли процессов миграции углеводородов в формировании кольцевых структур, является содержание водорастворенного метана в придонных водах и метана в остаточных газах донных отложений. С этой целью нами были составлены соответствующие схемы распределения концентраций (в об. %) метана по акватории озера и проанализировано положение кольцевых структур относительно аномалий метана.

Анализ схем показывает, что области с повышенной концентрацией метана как в остаточных газах донных отложений (рис. 3), так и водорастворимых газах в придонных водах во всех случаях приурочены к проявлениям гидратов и отсутствуют в районах акватории многократного образования кольцевых структур: мысы Крестовский и Нижнее Изголовье, залив Култук и др. Тем более не обнаружены высокие концентрации метана и в Северной котловине. Таким образом, анализ наших данных газовой съемки также не подтверждает решающего участия газовых гидратов и глубинных выбросов природного газа, основным компонентом которых является метан, в формировании кольцевых структур. Исследования в этом направлении необходимо продолжить, что увеличит плотность наблюдений и позволит повысить обоснованность полученных выводов. В настоящее время плотность нашего

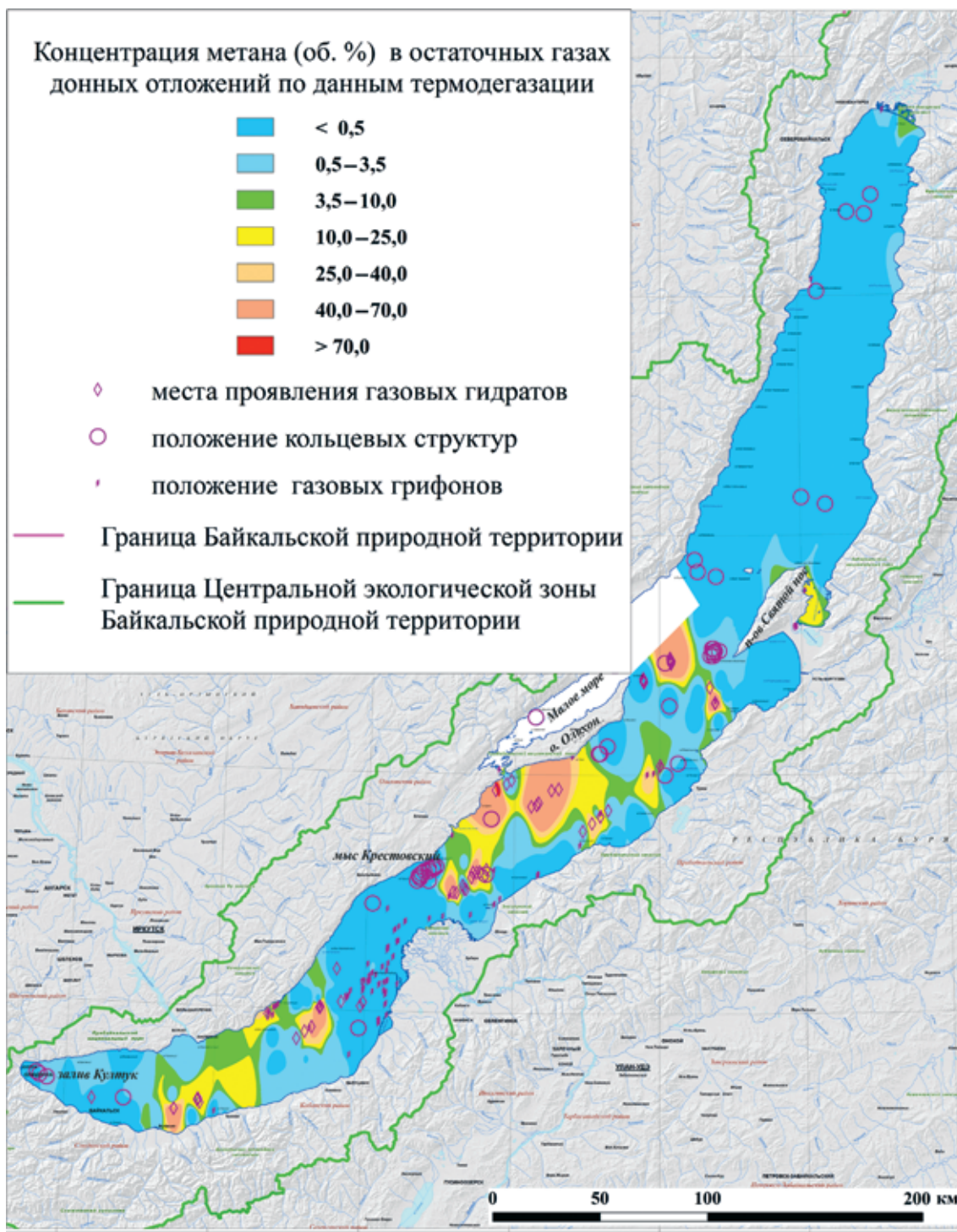


Рис. 3. Схема распределения концентраций метана (об. %) в остаточных газах донных отложений и положения центров кольцевых структур [11]

опробования для оз. Байкал по термодегазации донных осадков в среднем составляет одну пробу на 148 км², а по придонным водам — одна проба на 158 км².

Впервые вопрос о роли геологического строения дна в районах появления «ледовых колец» и инфильтрации низкотемпературных гидротермальных растворов в их формировании был поставлен в публикации доклада «О роли процессов миграции углеводородов в формировании

кольцевых структур на льду озера Байкал» [9], в котором рассматривались первые результаты анализа данных непрерывного сейсмоакустического профилирования.

В последнее время нами получены новые геофизические данные об особенностях строения геологического разреза верхней части осадочной толщи в районах акватории частого проявления кольцевых структур. Они позволяют с большей уверенностью говорить о предложенной

модели [9]. В основу этих исследований положены результаты многолучевого эхолотирования и НСП.

Были обследованы три района акватории наиболее частого появления кольцевых структур: залив Култук, а также мысы Нижнее Изголовье и Крестовский. Важно, что все три района характеризуются разным сочетанием местных условий: морфологии донного рельефа, формы береговой линии, особенностей речной сети в прибрежной зоне и метеорологических факторов. Кольцевые структуры в заливе Култук приурочены к периферической зоне перехода денудационно-аккумулятивного склона, осложненного оползнями и расчлененными каньонами, к субгоризонтальной абиссальной равнине. В то время как в районе мысов Крестовский и Нижнее Изголовье – к субгоризонтальной абиссальной равнине.

Кольцевые структуры в заливе Култук (рис. 4). Обследованный участок акватории расположен в пределах юго-западного берегового склона залива, ширина которого около 6 км. Склон расчленен серией каньонов, которые являются продолжением береговых речных и крупных овражных систем. Многолучевое эхолотирование не выявило на акватории залива выходов газа со дна. По характеру волнового поля на сейсмограммах можно выделить два комплекса. Первый (нижний) присутствует на всех профилях и характеризуется высокой акустической жесткостью и небольшой глубиной проникновения акустического сигнала. Верхний комплекс имеет несогласное и фрагментарное распространение.

Отмечается чередованием параллельных отражений, часто смятых в складки, и может отождествляться с современными и голоценовыми осадками. Появившиеся в разное время на льду залива кольцевые структуры приурочены к периферической зоне берегового склона.

На профиле, который пересекает кольцевую структуру (рис. 5), в рельефе дна на глубинах 1200–1260 м наблюдаются осложняющие его конседиментационные тектонические нарушения. На сейсмограмме в области этой структуры акустические границы становятся неотчетливыми и часто совсем пропадают. Это является признаком существования проницаемого канала в разрезе осадков. Полученные данные позволяют предполагать причинно-следственную связь между наличием проницаемого канала и кольцевых структур.

Кольцевые структуры в районе мыса Нижнее Изголовье полуострова Святой Нос. Интерес к этой части акватории озера прежде всего связан с многократным появлением здесь обширных кольцевых структур на поверхности льда, в том числе в 2019 и 2020 гг. (см. рис. 2). Район расположен к юго-востоку от Академического хребта вблизи с Ольхонским разломом северо-восточного простирания. Ближайшая суша – п-ов Святой Нос, который характеризуется отсутствием разветвленной речной сети.

Для изучения строения разреза донных отложений в месте образования колец было проведено НСП по профилю, пересекающему акваторию озера в этом районе. Анализ сейсмограммы

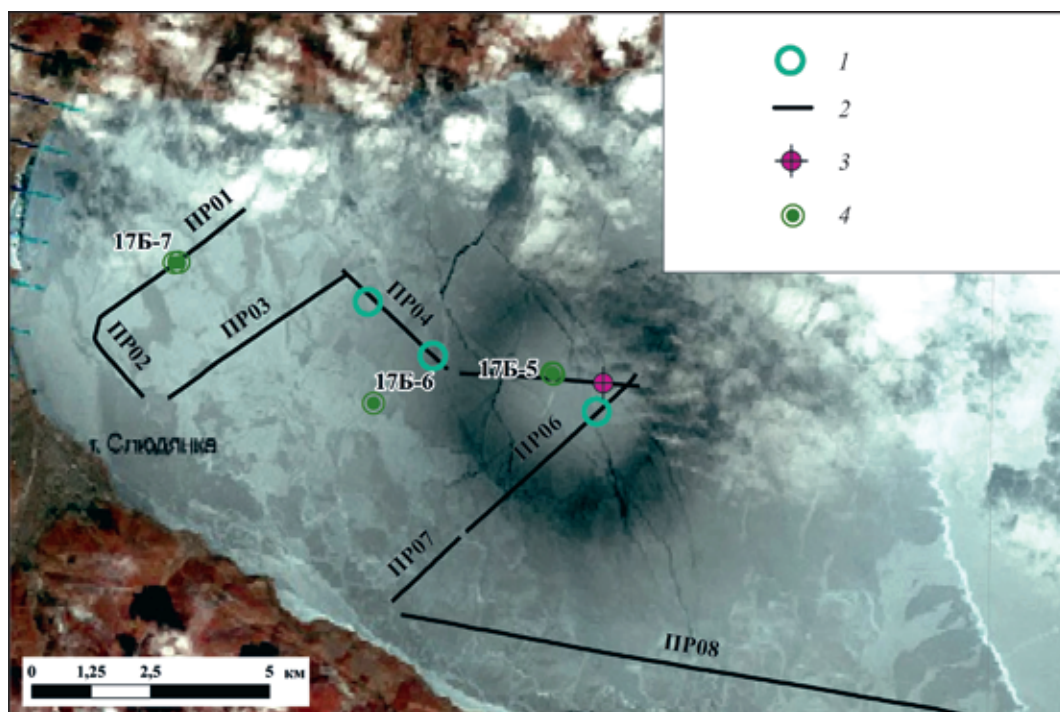


Рис. 4. Кольцевая структура на льду в районе залива Култук (космический снимок от 20 апреля 2009 г., <http://www.sovsekretno.ru/news/id/9243>)

1 – центры кольцевых структур по [11]; 2 – профиль НСП; 3 – положение проницаемого канала на профиле НСП; 4 – станции донного пробоотбора

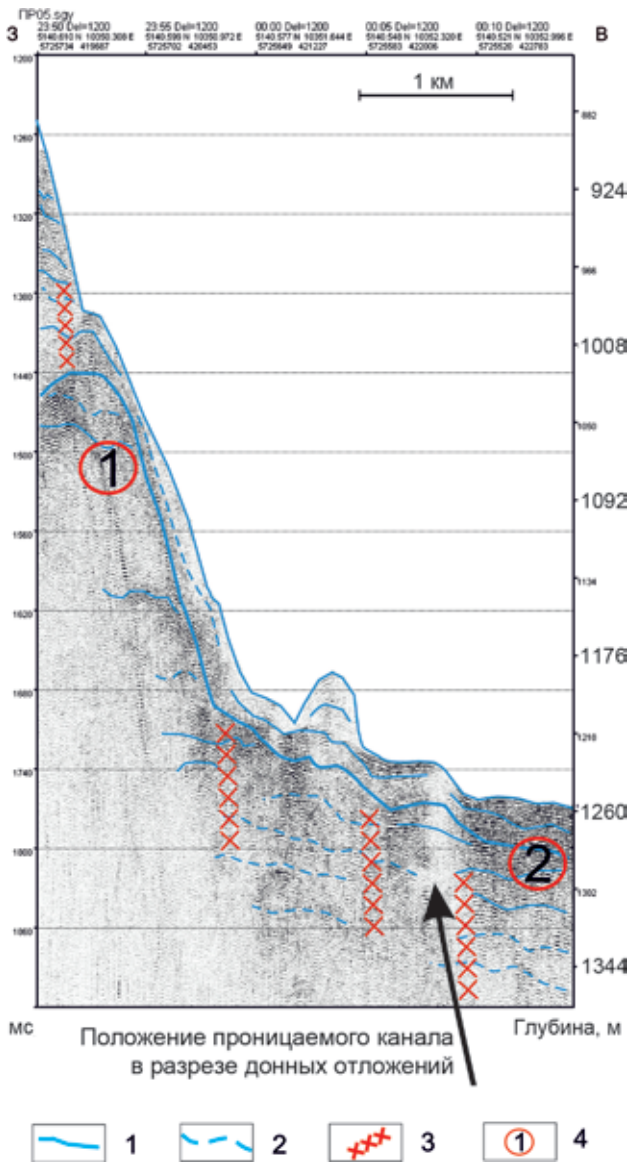


Рис. 5. Фрагмент сейсмограммы геологического разреза (профиль 05) в районе кольцевой структуры, залив Култук 1 – достоверные и 2 – предполагаемые сейсмоакустические границы; 3 – зоны тектонических нарушений; 4 – генетический тип рельефа: 1 – денудационно-аккумулятивный склон (до 25°), осложненный оползнями и расчлененный каньонами, 2 – субгоризонтальная абиссальная равнина (бассейновая аккумуляция), уклон 1°–5°, 3 – аккумулятивные приподнятые в разной степени расчлененные поверхности (см. на рис. 7)

профиля показал, что область появления кольцевых структур приурочена к переходу от крутого склона, осложненного оползнями и каньонами, к абиссальной равнине и характеризуется резким перепадом глубин на величину более 500 м (рис. 6). Разрывные тектонические структуры, контролирующие положение склона, сопровождаются серией конседиментационных нарушений. Кроме тектонических нарушений в структуре акустического поля можно выделить три основных акустических комплекса. Первый снизу характеризуется акустической жесткостью и фрагментарным

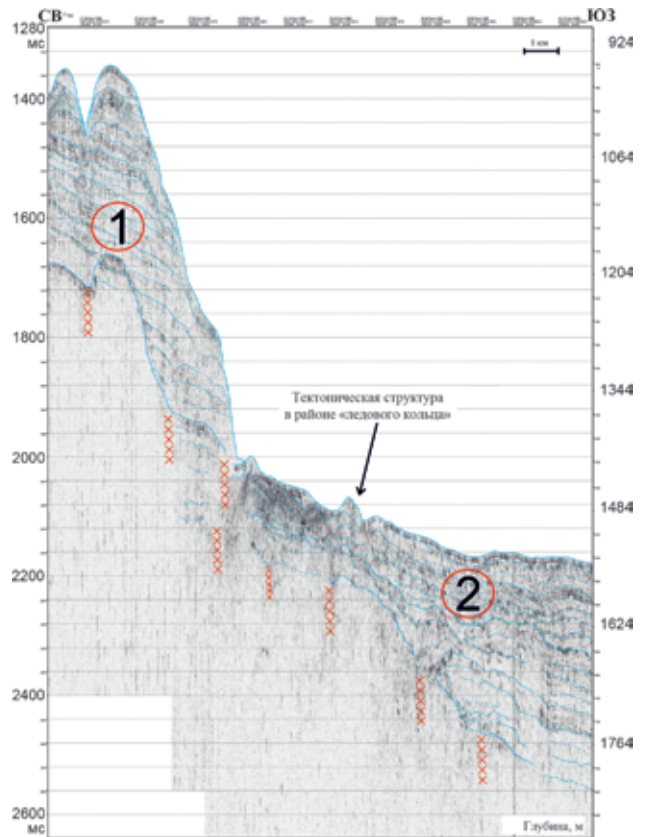


Рис. 6. Особенности строения геологического разреза донных отложений в районе кольца у мыса Нижнее Изголовье по данным НСП

Усл. обозн. см. на рис. 5

проявлением рефлексов. Второй имеет отчетливо выраженную слоистую структуру отражающих горизонтов. При этом границы между пачками неровные, горизонты имеют переменную мощность и смяты в складки, наблюдаются внутриформационные несогласия, свидетельствующие о высокой активности тектонических процессов в этой части акватории. Мощность второго комплекса достигает 270 м в самой юго-восточной части профиля. Третий, самый поверхностный комплекс, имеет небольшую мощность, которая составляет около 10–15 м. Он представлен параллельно-слоистым чередованием отражающих границ, повторяющих форму донной поверхности. В области дна, находящейся непосредственно под районом появления колец, наблюдается усложнение рельефа, которое сопровождается изменениями в характере акустического поля. Отражающие границы становятся менее отчетливыми, а регулярная слоистость пропадает как во втором, так и в поверхностном акустических комплексах. Структура сопровождается тектоническими нарушениями и подъемом пород первого акустического комплекса. Исходя из полученных данных, можно предположить, что появление кольцевых структур может быть связано со специфическим геологическим строением геологического разреза в этом районе акватории. Однако для решения вопроса возможной генетической связи колец

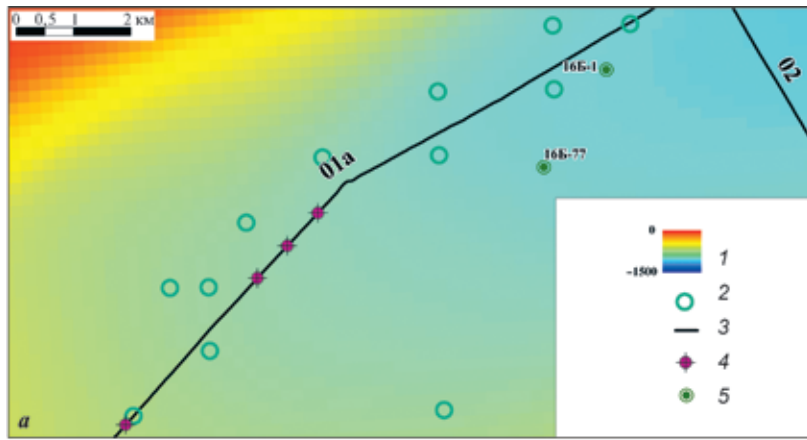
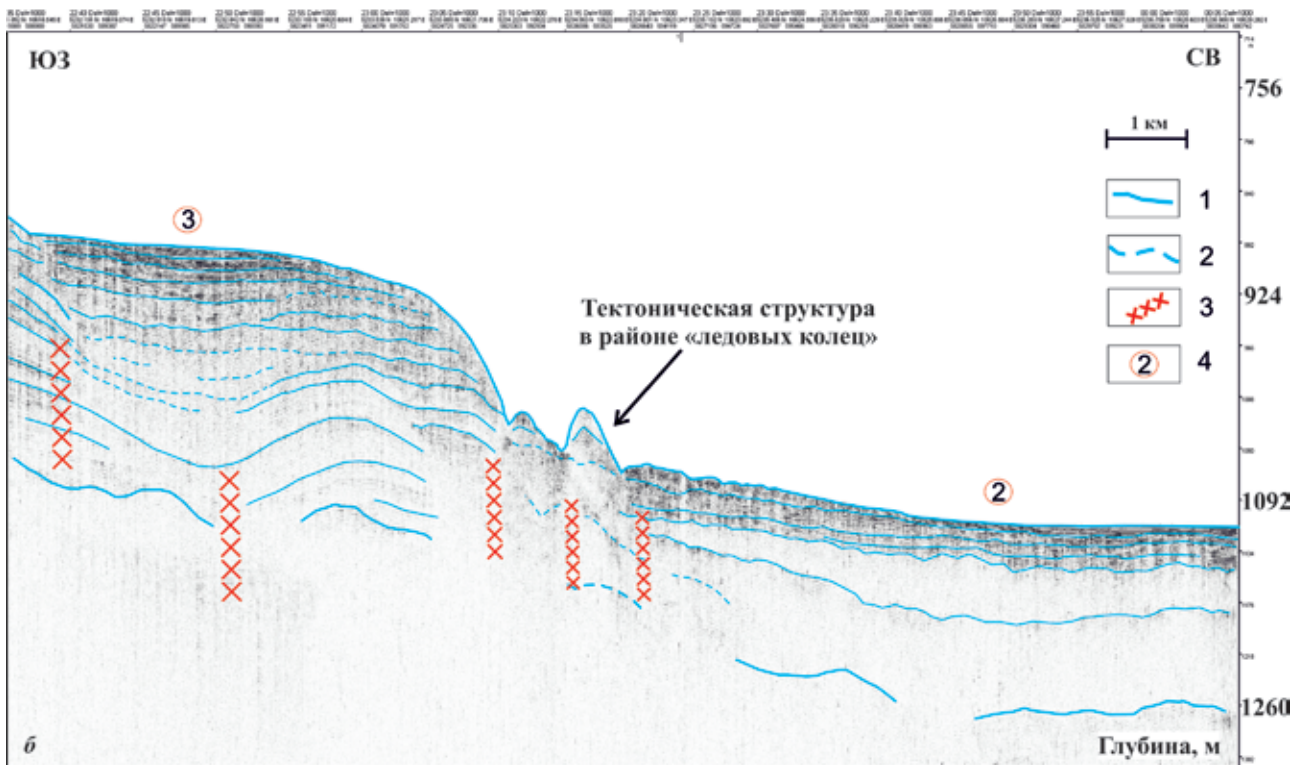


Рис. 7. Расположение центров «ледяных колец» по отношению к конседиментационным тектоническим структурам – *a*, фрагмент сейсмограммы геологического разреза (профиль 01а) в районе кольцевых структур, мыс Крестовский – *б*

a – 1 – шкала глубин, м; 2 – центры кольцевых структур по [11]; 3 – профиль НСП; 4 – положение конседиментационных тектонических нарушений на профиле НСП; 5 – станции донного пробоотбора;

б – см. усл. обозн. на рис. 5



с геологическим строением и выявления собственно проницаемого канала в разрезе донных осадков необходимо проведение более детальных как геофизических, так и геолого-гидрогеохимических исследований.

Кольцевые структуры в районе мыса Крестовский. В этом районе экватории кольцевые структуры неоднократно появлялись на льду в полосе протяженностью около 10 км на расстоянии 4–7 км от берега. В прибрежной зоне речная сеть практически отсутствует. При глубинах озера 850–1100 м рельеф дна имеет слаборасчлененный характер. Генетический тип рельефа – субгоризонтальная абиссальная равнина с бассейновым характером аккумуляции, к западу переходящая в аккумулятивные приподнятые в разной степени расчлененные поверхности. Признаков активного выделения газов в водную толщу в районе исследований нами в настоящее время не установлено.

В 2018 г. в районе кольцевых структур пройден профиль НСП (рис. 7, *a*). Как видно на фрагменте сейсмограммы (рис. 7, *б*), рельеф дна осложнен серией холмообразных поднятий с превышением над дном от 30 до 50 м, которые приурочены к серии разрывных нарушений, выходящих на поверхность дна. В обе стороны от поднятий в верхней части разреза (общей мощностью около 40–50 м) структура волнового поля на сейсмограмме прослеживается достаточно хорошо. Серия сейсмоакустических границ при высокой интенсивности отраженного сигнала имеет субгоризонтальный характер со следами смятия и небольшой складчатостью, в основном облекающей нижележащие слои. В юго-западной части профиля при сохранении горизонтально слоистого характера разреза мощность донных отложений уверенно прослеживается до 150–200 м, а в северо-восточной части – только от 35 до 40 м. Ниже по разрезу амплитуда отраженного

сигнала резко падает. При значительно меньшей общей интенсивности прослеженных акустических границ внутренняя структура этих поддонных горизонтов практически не визуализируется. Характер сейсмоакустического разреза свидетельствует о том, что зона разрывных нарушений с осложнением рельефа дна располагается на границе двух блоков, отличающихся тектоническим режимом и особенностями осадконакопления, а это подтверждает современную тектоническую активность нарушений. В пределах самой зоны наблюдается существенное затухание отраженного акустического сигнала, а сами отражения носят фрагментарный характер, что может указывать на наличие проницаемого канала в геологическом разрезе донных отложений. Ширина этого канала вдоль линии профиля составляет около одного километра.

Заключение. Проведенные геолого-геохимические исследования показали, что образование «ледяных колец» на оз. Байкал не связано с проявлением газовых кристаллогидратов и выходами метана со дна озера. В то же время при проведении сейсмоакустических работ установлено, что в изученных районах частого обнаружения «ледовых колец» в геологическом разрезе донных отложений отчетливо выражены активные конседиментационные (современные) тектонические структуры, которые могут служить каналами глубинной разгрузки низкотемпературных гидротермальных растворов. На возможность участия гидротермальных вод в процессе формирования кольцевых структур указывает и широкое распространение проявлений современных гидротерм, приуроченных к центральной части Байкальской рифтовой зоны [7], где наиболее выражена неотектоническая активность. Примеры таких выходов термальных вод непосредственно в береговой зоне оз. Байкал – источники Кулиных болот и в бухте Змеиная Чивыркуйского залива, мыс Котельниковский, Горячинский, Хакуссский и др.

Полученные результаты позволяют полагать, что антициклонические конвекционные течения – следствие глубинной разгрузки низкотемпературных гидротермальных растворов. Предложенной модели не противоречат и характеристики водной толщи (температура, минерализация, плотность и др.) в районе кольцевых структур, наблюдаемые в ходе полевых исследований [11; 12], а именно: более высокая температура и минерализация подледной воды в ядре кольцевого течения по сравнению с его периферией.

Отсутствие полного совпадения положения предполагаемых проницаемых структур в геологическом разрезе донных отложений и центров «ледяных колец», наблюдаемых в разные годы, объясняется возможным пространственным дрейфом как самих кольцевых структур, так и проницаемых каналов, а также расхождением времени проявления «ледовых колец» и моментом проведения геофизических наблюдений. Кроме того, положение и размеры проницаемых

каналов, сопряженных с тектоническими структурами, могут несколько отличаться от тех, которые установлены только по одному пересечению профилем НСП. Задача дальнейших детальных сейсмоакустических, а также гидрогеохимических исследований – уточнение положения тектонических структур и сопряженных с ними каналов разгрузки гидротермальных растворов.

Исследования проведены в рамках завершенных государственных контрактов по геологическому изучению опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории, № 51 от 31.03.2016 и № 25 от 31.03.2017 (Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), Министерство природных ресурсов и экологии РФ) и договора № 1/2015 (ГК 155) от 31.07.2015 (ФГУГП «Гидроспецгеология»).

1. Балханов В. К., Бушкаев Ю. Б., Хаптанов В. Б. Феномен образования круговых колец на заснеженном ледовом поле озера Байкал // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 9. – С. 34–37.

2. Балханов В. К., Бушкаев Ю. Б. О возникновении конвективного тороидального вихря в воде Байкала // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 11. – С. 34–38.

3. Бордонский Г. С., Крылов С. Д. О природе кольцевых образований на спутниковых снимках ледяного покрова озера Байкал // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 4. – С. 27–31.

4. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2015 году». – Иркутск: АНО «КЦ Эксперт», 2016. – 374 с.

5. Гранин Н. Г. Окольцованный Байкал // Наука из первых рук. – 2009. – № 3. – С. 22–23.

6. Кольцевые структуры на ледовом покрове озера Байкал: анализ экспериментальных данных и математическое моделирование / Н. Г. Гранин, И. Г. Мизандронцев, В. В. Козлов и др. // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 11. – С. 1890–1903. – DOI: 10.15372/GiG20181111

7. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск: Наука, 1974. – 166 с.

8. Полевые исследования и некоторые результаты численного моделирования кольцевой структуры на льду озера Байкал / Н. Г. Гранин, В. В. Козлов, Е. А. Цветова, Р. Ю. Гнатовский // Докл. РАН. – 2015. – Т. 461, № 3. – С. 343–347.

9. Шахвердов В. А., Кропачев Ю. П., Московцев А. А. О роли процессов миграции углеводородов в формировании кольцевых структур на льду озера Байкал // География: развитие науки и образования. Т. I: Коллективная монография по материалам ежегодной Междунар. науч.-практ. конф. LXXI Герценовские чтения. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2018. – С. 203–205.

10. Khlystov O. M. Gas hydrates in Lake Baikal / O. M. Khlystov, A. V. Khabuev, H. Minami, A. Nachikubo, A. A. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – No. 1. – Pp. 66–70.

11. Kouraev A. V. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism / A. V. Kouraev, E. A. Zakharova, Frédérique Rémy, A. G. Kostianoy, M. N. Shimaev, N. M. J. Hall, A. Ya. Suknev // Limnology and

Oceanography. – 2016. – Vol. 61, no. 3. – Pp. 1001–1014. – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.10268/pdf> (дата обращения: 22.01.2021).

12. Kouraev A. V. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017) / A. V. Kouraev, E. A. Zakharova, Frédérique Rémy, A. G. Kostianoy, M. N. Shimaraev, N. M. J. Hall, R. E. Zdorovenov, A. Ya. Suknev // *Limnology and Oceanography*. – 2019. – Vol. 64, no. 6. – Pp. 2738–2754.

1. Balkhanov V. K., Bashkuev Y. B., Khaptanov V. B. Formation of circular rings on the snow-covered ice field of Lake Baikal. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 80, no. 9, pp. 34–37. (In Russian).

2. Balkhanov V. K., Bashkuev Y. B. On the appearance of a convective toroidal vortex in Lake Baikal. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 83, no. 11, pp. 34–38. (In Russian).

3. Bordonovskiy G. S., Krylov S. D. About nature of ring formations on satellite images of Baikal ice cover. *Issledovaniye Zemly iz Kosmosa*, 2014, no. 4, pp. 27–31. (In Russian).

4. O sostoyanii ozera Baykal i merakh po ego okhrane v 2015 godu [On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2015]. Gosudarstvennyy doklad. Irkutsk, 2016, 374 p.

5. Granin N. G. Okol'tsovannyi Baykal [The ringed Baikal]. *Science First Hand*, 2009, no. 3, pp. 22–23. (In Russian).

6. Granin N. G., Mizandronev I. B., Kozlov V. V. et al. Natural rings structures on the Baikal ice cover: analysis of experimental data and mathematical modeling. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 11, pp. 1890–1903. DOI: 10.15372/GiG20181111. (In Russian).

7. Lomonosov I. S. Geokhimiya i formirovanie sovremennykh gidroterm Baykal'skoy riftovoy zony [Geochemistry and formation of hydrotherm of the Baikal Rift Zone]. Novosibirsk, Nauka, 1974, 166 p.

8. Granin N. G., Kozlov V. V., Tsvetova E. A., Gnatovskiy R. Yu. Polevye issledovaniya i nekotorye rezul'taty chislennogo modelirovaniya kol'tsevoy struktury na l'du ozera Baykal [Field studies and some results of numerical modeling of a ring structure on Baikal ice]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2015, vol. 461, no. 3, pp. 343–347. (In Russian).

9. Shakhverdov V. A., Kropachev Y. P., Moskovtsev A. A. On the role of the processes of migration of hydrocarbons in the formation of ring structures on the ice of Lake Baikal. *Geography: development of science and education. Part I. Collective monograph on the materials of International Scientific-Practical Conference LXXI Herzen readings 18–21 April 2018, devoted to the 155 anniversary since the birth of Vladimir Ivanovich Vernadsky*. St. Petersburg, 2018, pp. 203–205. (In Russian).

10. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H., Hachikubo A., Krylov A. A. Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, no. 1, pp. 66–70.

11. Kouraev A. V., Zakharova E. A., Frédérique Rémy, Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes Baikal and Hovsgol: Inventory, associated water structure and potential formation mechanism. *Limnology and Oceanography*, 2016, vol. 61, no. 3, pp. 1001–1014, available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.10268/pdf> (accessed 22 January 2021).

12. Kouraev A. V., Zakharova E. A., Frédérique Rémy, Kostianoy A. G., Shimaraev M. N., Hall N. M. J., Zdorovenov R. E., Suknev A. Ya. Giant ice rings on lakes and field observations of lens-like eddies in the Middle Baikal (2016–2017). *Limnology and Oceanography*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2754.

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹.
<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Кропачев Юрий Петрович – вед. инженер, ВСЕГЕИ¹. <Yuri_Kropachev@vsegei.ru>

Московцев Александр Артемович – инженер, ВСЕГЕИ¹. <aleks_moskovtsev@vsegei.ru>

Дронь Олег Владимирович – инженер, ВСЕГЕИ¹. <oleg_dron@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹.
<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Kropachev Yuriy Petrovich – Leading Engineer, VSEGEI¹. <Yuri_Kropachev@vsegei.ru>

Moskovtsev Aleksandr Artemovich – Engineer, VSEGEI¹. <aleks_moskovtsev@vsegei.ru>

Dron Oleg Vladimirovich – Engineer, VSEGEI¹. <oleg_dron@vsegei.ru>

¹ 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.