

УДК 552.578.2.061.33:553.98(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_4-28

О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев,
О. В. Дронь (ВСЕГЕИ), В. П. Исаев, А. Г. Кичигин (ООО «Байкальский центр»),
А. М. Лыгин (Гидроспецгеология)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ ИЗУЧЕНИЮ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С МИГРАЦИЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ В АКВАТОРИИ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Дана общая оценка геологического строения впадины озера Байкал. Рассмотрены вопросы, связанные с методикой и основными результатами изучения процессов миграции углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории в период 2015–2020 гг. Получен обширный материал по геологическому строению верхней части разреза современных осадков, геохимическим, физико-химическим и другим особенностям придонной области озера. Составлен электронный атлас карт центральной экологической зоны Байкальской природной территории масштаба 1 : 1 000 000, электронный каталог проявлений УВ и зон их разгрузки. Показана высокая эффективность комплексирования различных геологических методов с целью выделения, изучения и мониторинга объектов природной миграции углеводородов.

Ключевые слова: озеро Байкал, углеводороды, методы геологических исследований.

O. V. Petrov, A. I. Larichev, V. A. Shakhverdov, A. V. Brylina, Yu. P. Kropachev,
O. V. Dron (VSEGEI), V. P. Isaev, A. G. Kichigin (Baikal Center LLC),
A. M. Lygin (Gidropspetsgeologiya)

MAIN RESULTS OF GEOLOGICAL STUDIES OF PROCESSES RELATED TO THE HYDROCARBON MIGRATION IN THE LAKE BAIKAL WATER AREA

A general assessment of geology of the Lake Baikal basin is given. Issues related to the methodology and main results of studying hydrocarbon migration processes in the central environmental zone of the Baikal natural area from 2015 to 2020 are discussed. Extensive material has been obtained on geology of the upper part of the section of recent sediments, geochemical, physicochemical and other features of the near-bottom area of the lake. An electronic atlas of 1:1M maps of the central ecological zone of the Baikal natural area and an electronic catalogue of hydrocarbon occurrences and their discharge zones were compiled. The high efficiency of combining various geological methods for identifying, studying and monitoring sites of natural hydrocarbon migration is shown.

Keywords: Lake Baikal, hydrocarbon, methods of geological studies.

Для цитирования: Петров О. В. Основные результаты работ по геологическому изучению процессов, связанных с миграцией углеводородов в акватории озера Байкал / О. В. Петров, А. И. Ларичев, В. А. Шахвердов, А. В. Брылина, Ю. П. Кропачев, О. В. Дронь, В. П. Исаев, А. Г. Кичигин, А. М. Лыгин // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 4–28. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_94_4-28.

Введение. Данная статья открывает цикл публикаций по результатам исследований, которые проводились с 2015 по 2020 год в рамках работ по геологическому изучению опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории. В ней рассматриваются наиболее общие вопросы, связанные с методикой и основными результатами проведенных исследований на акватории озера Байкал.

Целью работ являлось геологическое изучение опасных процессов, связанных с природной мигра-

цией углеводородов (УВ) в центральной экологической зоне Байкальской природной территории (ЦЭЗ БПТ). Это потребовало решения следующих основных задач: оценка и мониторинг современного состояния и активности опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов; выявление основных геологических опасностей, связанных с миграцией углеводородов; создание электронного атласа карт, разрезов и видеоматериалов опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов.

В состав Байкальской природной территории (БПТ) входят озеро Байкал, его водоохранная

зона и водосборная площадь в пределах границ Российской Федерации, особо охраняемые природные территории (ООПТ), а также прилегающая к озеру Байкал зона шириной до 200 км на запад и северо-запад от него (ст. 2 ФЗ «Об охране озера Байкал»).

Границы БПТ утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2006 г. № 1641-р «О границах Байкальской природной территории», листы О-48-49, N-48-49, М-48-49 (все частично). Непосредственно к побережью Байкала примыкают 12 ООПТ, в том числе три заповедника, два национальных парка, шесть заказников. Кроме них на БПТ сеть ООПТ представлена ботаническим садом, природным парком; систематизирован материал по 147 геологическим памятникам природы статусов: действующий, предлагаемый, упраздненный. Границы водоохранной зоны озера были утверждены Распоряжением Правительства РФ от 05.03.2015 № 368-р.

Объект исследования. Изучение процессов миграции углеводородов из осадочной толщи в акваторию озера Байкал началось около 250 лет назад с исследования естественных проявлений газа, нефти и битумов. Наиболее активно изучение углеводородов на Байкале проводилось в 1930-х, 1950-х и в 1990-х годах преимущественно с целью поиска месторождений. Специализированные работы по изучению процессов, связанных с миграцией углеводородов, в пределах акватории и побережья озера Байкал стали проводиться с 1960-х годов. Среди этих работ можно упомянуть как однократные кратковременные исследования, выполненные Всесоюзным научно-исследовательским институтом ядерной геофизики и геохимии (ВНИИЯГГ) и Всесоюзным научно-исследовательским институтом природных газов (ВНИИГАЗ), так и многолетние исследовательские работы иркутских геологов из треста ПГО «Востсибнефтегеология», Иркутского государственного университета (кафедра нефти и газа) и Лимнологического института СО РАН [21; 27; 28]. Анализ и обобщение наиболее представительных и информативных материалов приводятся в производственных геологических отчетах, монографиях, публикациях, а также докладах.

Уникальность Байкала и его недр, с геологической точки зрения, заключается в том, что он одновременно является водным, седиментационным, осадочно-породным и нефтегазоносным бассейном. В нем существуют все положительные признаки нефтегазоносности, присущие другим известным нефтегазоносным бассейнам: наличие терригенных осадков большой мощности и присутствие рассеянного органического вещества в значительных концентрациях, достаточных для формирования нефтегазоматеринских толщ, благоприятные термобарические условия для масштабной генерации газообразных и жидких углеводородов. Они представлены горючим газом, нефтью, нефтяными битумами, газовыми кристаллогидратами, «газогрязевыми» вулканами,

углеводородными газами, растворенными в воде и углеводородными газами донных осадков. Образование перечисленного разнообразия углеводородов обусловлено благоприятным сочетанием всех геологических факторов нефтегазоносности: тектонических, литологических, стратиграфических, геохимических, гидрогеологических и термодинамических. При этом решающее значение для формирования углеводородных систем имеет мощная осадочная толща, сформировавшаяся за последние 25–30 млн лет.

В недрах осадочной толщи генерируются значительные скопления УВ (горючего газа, нефти), которые в процессе миграции постоянно поступают в акваторию озера Байкал. Возможно, что недра Байкала в настоящее время являются своеобразным автоклавом, в котором интенсивно и постоянно протекают процессы генерации углеводородных газов и, прежде всего, метана. При любом, даже очень слабом землетрясении могут происходить стихийные и даже катастрофические его выбросы. Аномально высокие объемы разгрузки УВ опасны не только для уникальной флоры и фауны озера Байкал, но и для людей.

Интерес к изучению процессов миграции УВ существенно возрос в связи с обнаружением газовых кристаллогидратов в 1997 г. при проведении глубоководного бурения по проекту «Байкал-бурение», когда при бурении скважины в Южной котловине озера Байкал (скв. ВDP-97) был получен керн донных отложений, содержащий включения похожего на белый лед вещества, которое и оказалось газовым гидратом [1].

Особенности геологического строения БПТ. Обсуждая проблему образования и миграции углеводородов, рассматривается не только акватория озера, а Байкальская природная территория, которая находится в Байкальской рифтовой системе – крупнейшей активной Евразийской рифтовой системе (рис. 1), являющейся своеобразной природной лабораторией для наблюдения ранних стадий континентального рифтогенеза [30]. Неотектоническая структура этой части континента определяется взаимодействиями Сибирской, Китайской, Таримской, Индийской древних платформ и Тибетского массива, которые в качестве жестких блоков существовали, начиная с нижнего палеозоя [25].

Возраст рифта определяется по отложениям и осадкам древнейших синрифтовых отложений. Наиболее широко распространено мнение об олигоцен-миоценовом возрасте Байкальского рифта, предполагающее двухэтапную историю его развития: ранне- и позднеорогенный этапы [8; 18; 19]. Однако эти положения не совсем согласуются с наблюдаемыми геологическими особенностями района и противоречат результатам реконструкции полей палеонапряжений. По последним представлениям, древнейшие отложения Байкальской впадины определены как верхнемеловые (60–70 млн лет), что наиболее полно соответствует имеющимся геолого-геофизическим данным [13; 14; 35].

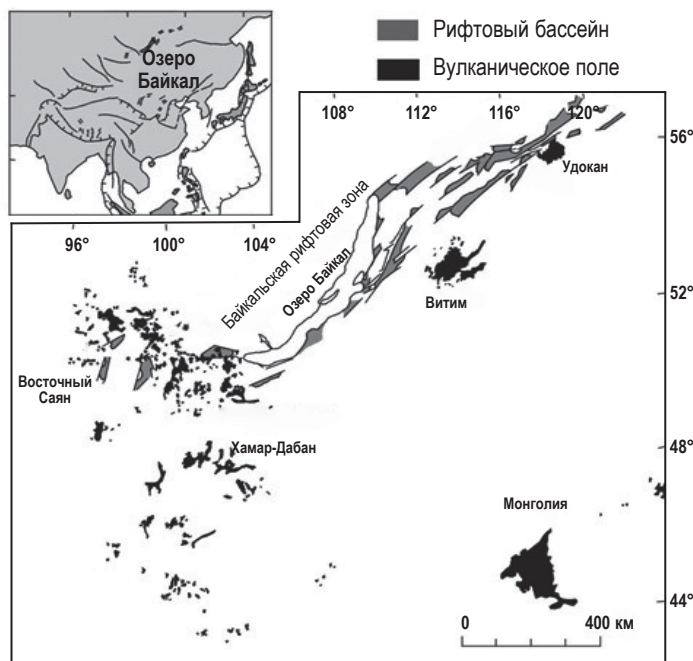


Рис. 1. Расположение бассейнов, входящих в Байкальскую рифтовую систему [32] с изменениями [30]

Представление о геологическом строении Байкальской впадины сложилось по результатам глубоководного бурения, геофизическим данным (в большей мере сейсморазведке) и детальному литолого-стратиграфическому анализу синрифтовых комплексов на окружающей озеро суше.

Морфологически впадина озера Байкал состоит из трех котловин – Северной, Центральной и Южной, разделенных двумя поднятиями – Академическим хребтом и Селенгинско-Бугульдейской перемычкой. Наиболее глубоководной является Центральная котловина озера Байкал – 1637 м. Максимальная глубина Южной котловины – 1461 м, а Северной редко превышает 900 м (максимальная глубина – 904 м). Во всех котловинах Байкала разрез донных отложений, полученный в результате бурения, характеризуется ритмичностью, связанной с чередованием прослоев терригенных глинистых осадков и диатомовых илов. Результаты глубоководного бурения и литологического описания керна позволили оценить

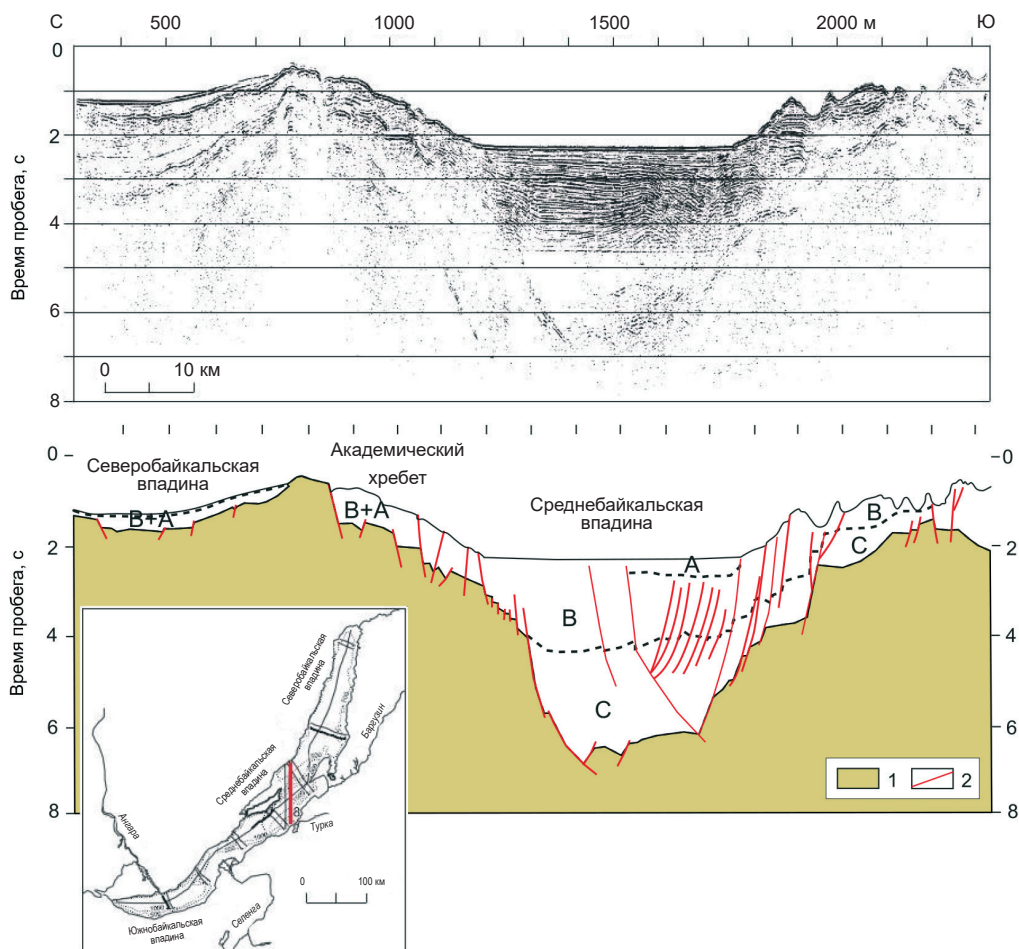


Рис. 2. Сейсмический разрез МОВ-ОГТ по профилю 8, проходящий через подводный Академический хребет и примыкающие к нему Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины [31] с изменениями [15]

А – слоистый недеформированный комплекс – ССК-3 (верхний плиоцен – квартер); В – слоистый деформированный комплекс – ССК-2 (верхний олигоцен – нижний плиоцен); С – прозрачный сейсмический комплекс – ССК-1 (верхний мел – нижний олигоцен)

1 – дорифтовый фундамент; 2 – предполагаемые разломы. На врезке – положение профиля на схеме озера Байкал

строение осадочной толщи и выяснить условия осадконакопления в различных морфоструктурах озера [5; 12].

Так как Байкальский рифт имеет сложную многоэтапную историю развития, возраст и условия формирования его Южной, Центральной и Северной котловин различны, что довольно четко фиксируется на сейсмических разрезах.

На рис. 2 представлена модель строения озера Байкал, выполненная по результатам интерпретации сейсмического разреза МОВ, проходящего через Северобайкальскую и Среднебайкальскую впадины [15; 31]. Согласно данным работам, мощность осадочного выполнения Байкала составляет 7–8 км.

Довольно близкие подсчеты мощности (до 9,5 км) в Среднебайкальской котловине представлены по результатам интерпретации материалов метода преломленных волн (МПВ) (рис. 3) [30]. Представление о строении Южнобайкальской котловины было получено из результатов сейсмических работ методом МПВ вдоль профиля Солзан–Посольское (рис. 4).

Осадочная толща краевых зон Байкальского рифта и внутренней части Байкальской впадины исследована по обнажениям. В разрезах донных осадков выделены три тектоно-литостратиграфических комплекса (ТЛСК) (табл. 1) [14; 15]. ТЛСК-1 слагают преимущественно мел-эоценовые мономиктовые отложения различной фациальной и генетической природы и латерит-каолинистая кора выветривания [11]. ТЛСК-2 представлен олигоцен-нижнеплиоценовыми терригенно-глини-

стыми отложениями нижней молассы. В составе данного комплекса преобладают песчано-глинисто-алевритовые отложения прибрежно-озерного, озерного и дельтового генезиса (танхойская свита). Присутствуют и грубообломочные отложения конусов выноса (осиновская свита), отложения, характерные для малоглубинных озер (тагайская свита) и крупных, достаточно глубоких озер (сасинская свита). ТЛСК-3 включает в себя верхнеплиоцен-четвертичные полимиктовые отложения, отнесенные к осадкам верхней молассы. Состав комплекса характеризуется отложениями прибрежной зоны крупного глубоководного озера, сменяющиеся во внутренней части глубоководными глинисто-алевритовыми осадками [5; 14; 15; 17].

Данным тектоно-литостратиграфическим комплексам Прибайкалья соответствуют три сейсмостратиграфических комплекса (ССК) в разрезе донных отложений (табл. 1) [8; 14; 18; 34; 36]. ССК-1 – прозрачный сейсмический комплекс, слагающий наиболее глубоководные части осадочного разреза, залегающие непосредственно на породах фундамента в центральной части хребта. Присутствует только в Южной и Средней котловинах Байкала. ССК-2 – слоистый сильно деформированный комплекс, содержащий довольно протяженные отражающие горизонты, разбитые множеством дизъюнктивных нарушений. Распространен по всей акватории озера Байкал. ССК-3 – слоистый недеформированный комплекс, залегающий с несогласием на ССК-2. Выявлен во всех трех котловинах Байкала.

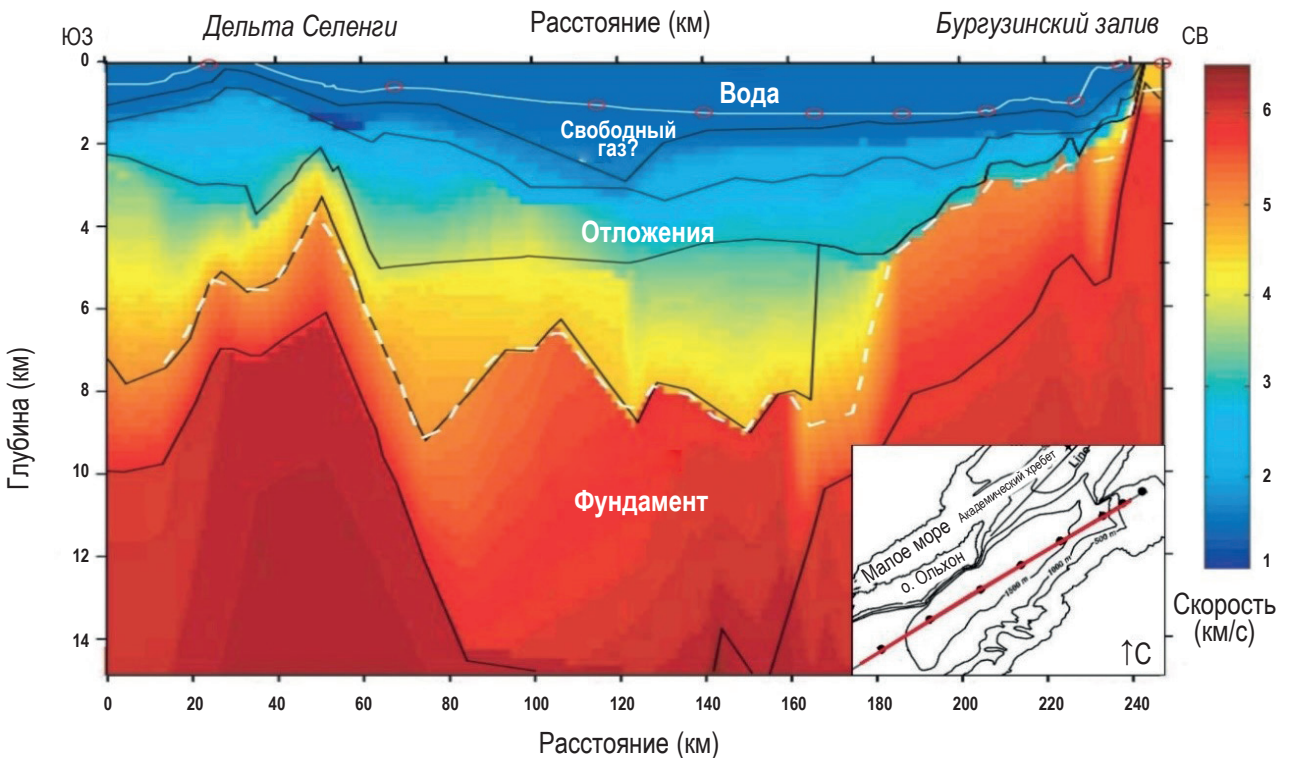


Рис. 3. Скоростная модель по данным МПВ вдоль Центральной Байкальской котловины. Белая пунктирная линия – граница фундамента [29]

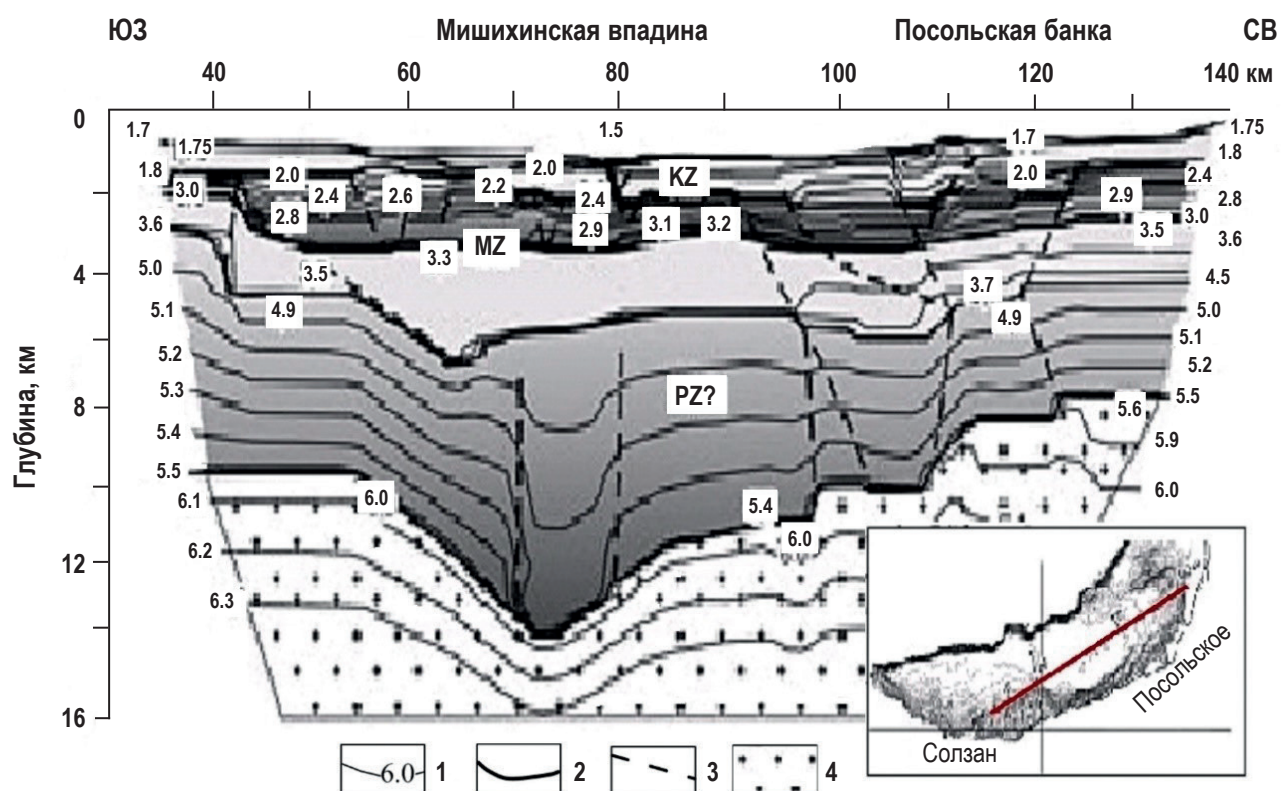


Рис. 4. Сейсмический разрез по результатам численного моделирования

1 – изолинии скорости (км/с); 2 – сейсмические границы; 3 – предполагаемые разломы; 4 – фундамент [26]

Таким образом, к настоящему времени получен достаточный объем данных о глубинном строении Байкальской котловины. Однако достоверная информация, которая могла бы дать однозначный ответ о структуре и возрасте глубокозалегающих комплексов пород, отсутствуют, а результаты интерпретации в рамках применяемых геофизических моделей неоднозначны.

Материалы и методы исследований. Многолетняя практика проведения геологосъемочных и эколого-геологических работ ФГБУ «ВСЕГЕИ» на различных акваториях показала, что среди методов исследований есть те, которые отличаются высокой степенью достоверности оценки состояния геологической среды и сопредельных с ней сред, и эффективно фиксируют их изменения и неоднородности. В основе этих исследований лежат методы комплексного геологического картирования, которые подразумевают сочетание как геологических и геохимических, так и геофизических методов. Главным результатом такого подхода является возможность унификации требований к системе наблюдений и сопоставимость полученных результатов. При изучении особенностей проявления опасных процессов, связанных с миграцией УВ на акватории озера, использованы следующие методы.

Дообработка и интерпретация сейсмических данных. При интерпретации сейсмических разрезов, полученных методом отраженных волн

общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) и непрерывного сейсмического профилирования (НСП), выполненной для изучения глубинного строения озера Байкал, применялись современные способы обработки материалов. Временные разрезы систематизированы в сводном сейсмическом проекте, в пакете программ CubeTechnology ©1990-2015, что позволило более уверенно идентифицировать отражающие сейсмические горизонты Байкальской котловины. Методика заключалась в следующем: после расчета геометрии наблюдений и редакции сейсмограмм выполнялось мультифокусирование сейсмограмм методом кинематической фильтрации [2]. Метод основан на том, что оптимальное суммирование сейсмических сигналов в методе ОГТ достигается за счет учета кривизны и наклона отражающих элементов при инвариантности относительно скорости распространения волн на интервале фокусировки. Дообработка временных разрезов МОВ-ОГТ и НСП включала в себя расчет разрезов методом «Сейсмостратиграфического суммирования» [4] и спектральную декомпозицию RGB [2].

Состав и схема обработанных многоканальных профилей и проинтерпретированных разрезов методом «Стратиграфического суммирования» представлены на рис. 5.

Геофизический комплекс методов, который включает непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокацию бокового обзора (ГЛБО) и многолучевое эхолотирование (МЛПЭ).

Таблица 1

Корреляция стратиграфических подразделений, тектонических фаз и сейсмических границ [15]

Система	Отдел/подотдел/ярус	Возраст нижней границы, млн лет [Geologic time ... , 2008]	Региональный корреляционный горизонт [Mats, 2013]	Тектоно-литостратиграфический комплекс	Сейсмостратиграфический комплекс [Hutchinson, et al., 1993]	Тектоническая фаза	Возраст, млн лет	Сейсмическая граница
Квартер	Голоцен	0,01	Нюрганский	ТЛСК-3	Слоистый недеформированный ССК-3	Тыйская	0,15–0,12	A2, U1
	Плейстоцен	0,13						
	средний	0,7						
Неоген	Плиоцен	1,80	Шанхаихинский (аносовский)	ТЛСК-2	ССК-2	Приморская	1,0–0,8	A1, U2
		верхний						
	Миоцен	5,3	Сасинский подгоризонт	ТЛСК-2-2	Верхний слоистый деформированный ССК-2-1	Нюрганская	2,0	B10, U3
		нижний						
	Олигоцен	16,1	Тагайский подгоризонт	ТЛСК-2-1	Нижний слоистый деформированный ССК-2-1	Северо-байкальская	10	B2, U5
		нижний						
Палеоген	Эоцен	28,4	Каменский	ТЛСК-1	Сейсмически прозрачный ССК-1	Тункинская	27–25	U6
		верхний						
Мел	Маастрихит	55,8	Фундамент	Фундамент	Фундамент	Ранняя рифтовая	70–60	?
		нижний						
	Фундамент	65,5						
	Фундамент	70,6						

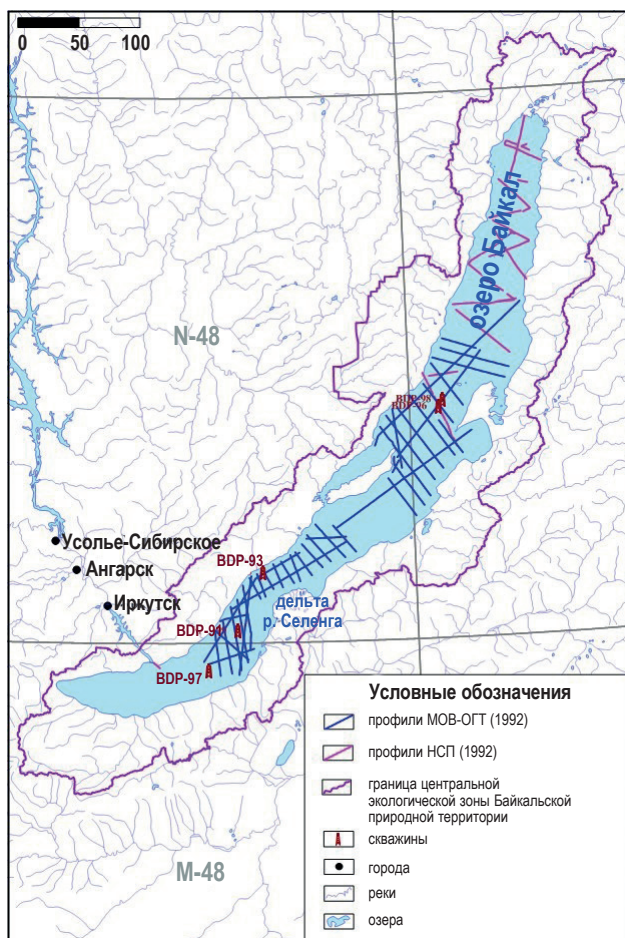


Рис. 5. Карта-схема озера Байкал с сейсмическими профилями 1992 г. (сост. С. А. Гриценко, 2020 г.)

НСАП позволяет, в отличие от методов МОГТ и НСП, указанных выше, с помощью волн звукового и ультразвукового диапазона получить детальные данные о строении верхней части геологического разреза. На территории исследования НСАП выполнялось с использованием сейсмоакустического приборно-аппаратурного комплекса GEONT-HRP (производство ООО «Спектр-Геофизика», Россия) с рабочей частотой – 0,3–2 кГц. Для возбуждения сейсмического импульса нами использовался электроискровой источник типа спаркер. Устойчивую его работу в пресных водах озера Байкал обеспечивал специальный электродный модуль собственного изготовления, 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 НСАП оценивалось состояние структурных сейсмостратиграфических и сейсмолитологических параметров верхней части геологического разреза дна вдоль трассы движения научно-исследова-

тельского судна (НИС). Также были установлены нарушения геологической среды, активизированные подходящие к поверхности дна разрывные нарушения, гравитационные смещения блоков пород, нарушения характеристичных мощностей отложений, структурные нарушения и т. п.

Гидролокация бокового обзора основана на получении акустической «фотографии» (сонограммы) поверхности дна с помощью сигналов в ультразвуковом диапазоне, посылаемых приемопередающей антенной, буксируемой НИС. Метод применялся для оценки площадей распространения, выяснения различий состава, границ распространения и размеров отдельных природных и природно-техногенных объектов, для выявления и детализации зон литодинамической активности и грязевулканической деятельности, а также для характеристики рельефа морского дна и состояния донных ландшафтов со всеми видами возможных нарушений геологической среды в ее поверхностном проявлении. Основным ограничением применения метода ГЛБО на Байкале является сложный рельеф с резким перепадом глубин.

Многолучевое эхолотирование выполнялось для получения детального качественного и количественного представления о морфологии рельефа дна и фиксации всех его изменений (нарушений), а также поиска и идентификации, объектов миграции углеводородов, проявленных в рельефе и в водной толще (рис. 6). Для съемки рельефа поверхности дна озера использовался автоматизированный комплекс на базе многолучевого эхолота EM710 норвежской фирмы «KONGSBERG». Его высокочастотная система с большой разрешающей способностью, обеспечивала соблюдение требований IHO S-44 Special Order, Order 1 как по точности и плотности зондирования, так и по обнаружению малых объектов.

Геологический комплекс методов относится к прямым методам исследований, что позволяет непосредственно наблюдать за состоянием геологической среды и происходящими в ней процессами и явлениями. Комплекс набортных исследований на станциях наблюдения включал геологическую и фотодокументацию донных отложений, получение образцов донного грунта и придонной воды на химико-аналитические исследования (гранулометрического анализа, определения содержания комплекса химических элементов в донных осадках и природных водах, нефтепродуктов и некоторых органических загрязнителей, определения радионуклидов и др.), оперативную дегазацию образцов донного грунта и природных вод для изучения водорастворенных и остаточных газов донных отложений, а также определение быстро меняющихся физико-химических показателей воды (Eh, pH и T °C) и донного грунта (pH и T °C).

Для фототелевизионного профилирования использовались подводный дистанционно управляемый дрон Chasing M2 (рис. 7), а также телеуправляемый подводный аппарат (ТПА) Fish-106.

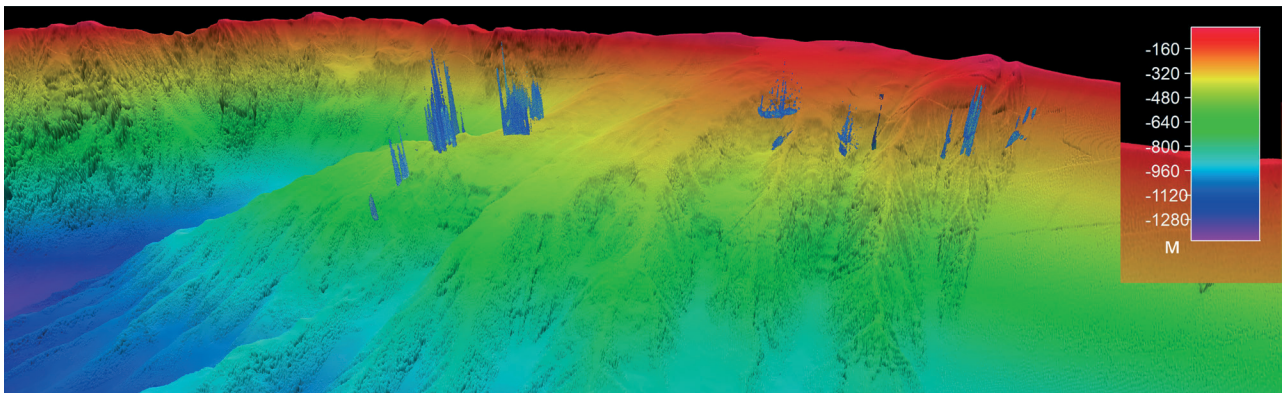


Рис. 6. Трехмерная модель рельефа дна и струй газовых эманаций в толще воды по данным многолучевого эхолотирования района проявления газовых гидратов Голоустное

Подводные фото- и видеосъемка проводилась для наблюдения и съемки объектов миграции углеводородов, заверки и интерпретации данных ГЛБО и пробоотбора, для визуализации и детального изучения опасных литодинамических процессов, в том числе в пределах районов предполагаемого проявления «грязевых» вулканов и газопроявлений (грифонов).

Для геологического отбора донного грунта применялись коробчатый пробоотборник боксскорер (рис. 7,в), труба гравитационная (рис. 7,з) и бентосная герметичная трубка (рис. 7,д). Газо-гидрогеохимический отбор воды из придонного слоя выполнялся с помощью бентосной трубки, боксскорера или батометра (рис. 7,е).

При выявлении газовых гидратов производился отбор их образцов и специализированная обработка с целью выделения газовой и водной составляющих для подготовки проб на изотопные и геохимические исследования.

Измерения массовой концентрации нефтепродуктов в воде выполнялись непосредственно после отбора проб на анализаторе жидкости «Флюорат-02-2М» (ООО «Люмэкс», Санкт-Петербург). Применялась «Методика проведения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах природной, питьевой и сточной воды флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» – ПНД Ф 14.1:2.4.128-98, которая обеспечивала выполнение измерений концентрации нефтепродуктов для природных и питьевых вод в диапазоне от 0,005 до 50 мг/дм³.

Химико-аналитические исследования. Анализ геохимических проб на содержание в них химических элементов выполнялся в Центральной лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» по утвержденным отраслевым или государственным методикам; в отдельных случаях – по прошедшим метрологическую аттестацию методикам предприятия. Корректность результатов гарантируется применением государственных стандартных образцов состава, большой коллекцией которых располагает лаборатория. С 1999 г. Лаборатория является корпоративным членом Международной ассоциации геоаналитиков (IAG), объединяющей свыше 200 лабораторий основных развитых стран.

Комплекс геохимических аналитических методов включал приближенно-количественный эмиссионный спектральный анализ на 46 элементов (ПКЭСА), масс-спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS) для определения Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Pb, As в донных осадках и Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Rb, Y, Mo, Ag, Cd, Te, Ba, La, Hf, W, Pb, Bi, U в придонных водах, флуориметрический метод анализа для определения массовой концентрации нефтепродуктов (общих). Для определения ртути применялся непламенный метод атомной абсорбции.

Анализ изотопного состава водорода и кислорода (dD, d¹⁸O) в пробах воды выполнялся в Центре изотопных исследований (ЦИИ) ФГБУ «ВСЕГЕИ» так же, как и определение изотопного состава углерода (δ¹³C) газов, в том числе полученных в результате разложения газовых кристаллогидратов.

Хроматографический анализ газов выполнялся ООО ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск) с использованием отечественного высокочувствительного поверенного хроматографического газового комплекса серии «Хромос GX-10000» в соответствии со СТО-ИГ 026-2011 «Определения компонентного состава природных газовых смесей хроматографическим методом» (ФГУП «СНИИГГИМС»). Определялись следующие компоненты: CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₃H₈, C₃H₆, C₄H₁₀, nC₄H₁₀, C₄H₈, iC₅H₁₂, nC₅H₁₂, C₅H₁₀, iC₆H₁₄, nC₆H₁₄, C₆H₆, C₇H₈, C₆H₄(CH₃), орто- и пара-метаксилолы, N₂, O₂, CO₂, H₂, He. Отбор пробы осуществлялся согласно ГОСТу 18917-82 «Газ горючий природный. Методы отбора проб».

Для анализа литологического состава песчаных осадков применялся гранулометрический 19-фракционный ситовой анализ (анализаторная просеивающая машина AS 200 с управлением «g» фирмы Retsch), а для существенно глинистых отложений – лазерный анализатор частиц (седиментограф) Микросайзер 201А (ООО «Научные приборы», Россия).

Фактические материалы. Исследовательские работы на акватории озера Байкал выполнялись сотрудниками полевой партии ФГБУ «ВСЕГЕИ»

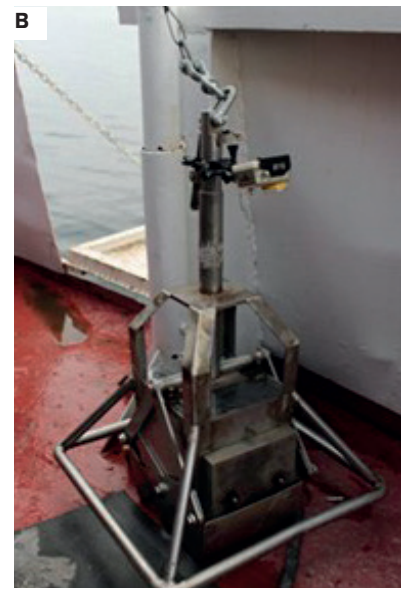
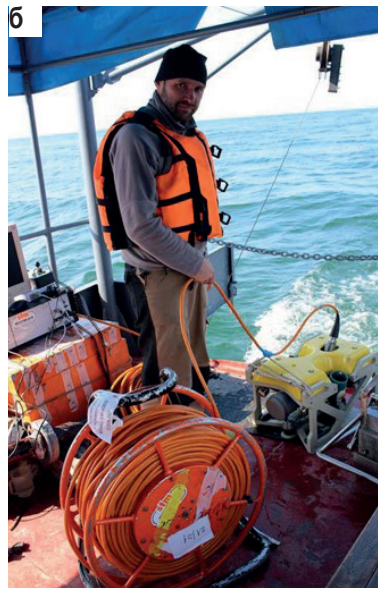
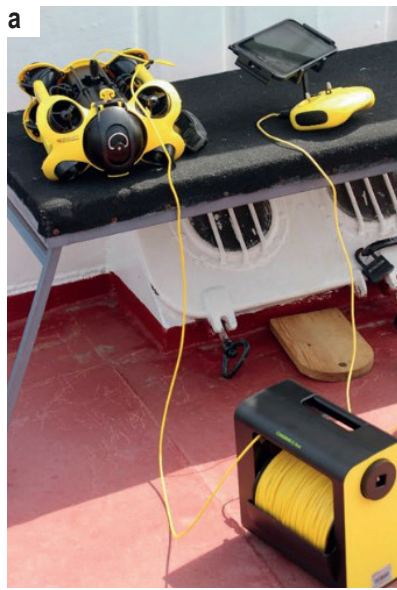


Рис. 7. Системы отбора проб и аппаратура
Дистанционно управляемые подводные дроны: а – Chasing M2; б – ТПА Fish-106.
Системы отбора проб, донного грунта: в –
коробчатый пробоотборник бокскорер; г –
труба гравитационная (3 м); д – бентосная
герметичная трубка; воды: е – батометр
конструкции «Нискина»

на судах Лимнологического института СО РАН: НИС «Академик Г. Ю. Верещагин», НИС «Академик В. А. Коптюг», НИС «Г. Титов»; Байкальского Музея Иркутского научного центра СО РАН НИС «Профессор А. А. Тресков», а также на катере «Ferretti Altura 39 – Sanritsu» ООО «Байкальский центр». Наибольший акцент в исследованиях уделялся не только выявлению и детальному обследованию отдельных объектов, но и региональному изучению особенностей процессов природной миграции углеводородов.

Всего на акватории озера литолого-геохимические наблюдения проведены более чем на 390 станциях (включая станции проведения фототелепрофилирования) и задокументировано около 130 м керна. В результате для проведения комплексных аналитических исследований получено более 500 проб донного грунта. Гидрогеохимическое опробование придонной воды выполнено более чем на 250 станциях. В том числе проведен анализ 12 проб остаточной воды газовых кристаллогидратов.

В ходе газогидрохимического опробования выполнен отбор водорастворенных газов как из придонной, так и приповерхностной воды. Проведена термодезгазация донных отложений. Общее количество проб газа на газохроматографический анализ, включая газ из газовых гидратов, составило 550 проб.

Одним из важнейших направлений работ явились измерения непосредственно на борту НИС быстро меняющихся физико-химических параметров, таких как щелочно-кислотные свойства и температура донных грунтов, а также окислительно-восстановительный потенциал (Eh), щелочно-кислотные свойства и температура придонных вод. Всего выполнено около 310 измерений Eh придонной воды и более 630 – pH и 650 – температуры грунта и придонной воды. При этом одновременные парные (как грунта, так и придонной воды) измерения температуры выполнены на 276 станциях.

Подводные телевизионные съемки газовых грифонов и донных ландшафтов проведены на 83 станциях.

Общая протяженность НСАП в акватории озера Байкал составила около 2600 линейных км. Выбор районов работ, направление профилей и их количество определялись в зависимости от наличия объектов миграции углеводородов и морфологии донного рельефа. Гидролокация бокового обзора проведена на более 950 линейных км, при ширине обзора от 50 до 100 м по одному борту. Общий объем многолучевого эхолотирования превысил 4500 линейных км.

Проведен значительный объем аналитических исследований, которые в том числе включали: определение концентрации химических элементов (Cd, Ni, Co, Cr, Pb, Zn, Cu, Fe, Mn, As, Hg) в донных осадках методом ICP MS – 476 анализов; определение химических элементов в воде методом ICP MS (на 30 элементов) – 255 анализов; определение углерода органического – 476 анализов;

определение массовой концентрации нефтепродуктов в придонной воде и донных осадках – 415 анализов; гранулометрический состав донных осадков – 297 анализов; хроматографический анализ остаточных газов донных отложений, растворенных и свободных газов – 566 анализов.

Основные результаты и их обсуждение. Обработка и интерпретация сейсмических данных. При интерпретации сейсмических разрезов МОГТ и НСП было выделено несколько отражающих горизонтов: граница фундамента «F», границы, соответствующие ольхонской и нюрманской тектоническим фазам («B6» и «B10») и горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR».

Определение границы фундамента является одним из наиболее важных и дискуссионных вопросов при изучении Байкала. На сейсмических разрезах под границей фундамента понимается сейсмический горизонт, ниже которого отраженные сейсмические волны не регистрируются или проявлены крайне слабо. Его поверхность характеризуется неровным, расчлененным рельефом (рис. 8). Граница фундамента Байкальской котловины соответствует подошве верхнемеловых–кайнозойских отложений осадочного чехла. Положение данного горизонта было выявлено различными методами (МОВ, МПВ) и представлено в независимых друг от друга работах [8; 9; 14; 15; 26; 30; 31].

Стратификация и слежение границы фундамента (горизонта «F») выполнялось на основании особого характера сейсмической записи на данной границе с учетом анализа ранее опубликованных материалов. В Южнобайкальской котловине положение сейсмического горизонта, соответствующего фундаменту «F», находится значительно глубже, чем в Центральной и Северной котловинах (рис. 4) [26]. Такая мощная толща осадочных отложений (более 12 км) объясняется автором наличием в Южной котловине, помимо пород кайнозойского и мезозойского возраста, более древних, предположительно, палеозойских отложений. Дальнейшее слежение горизонта «F» производилось на основании его увязки на пересекающихся профилях.

Среди толщ осадочного чехла были прослежены два опорных отражающих кайнозойских горизонта, наиболее выдержанные по всей акватории озера и имеющие стратиграфическую привязку по скважинам: «B6» (верхний миоцен) и «B10» (середина эоценового периода).

Горизонт «B10» соответствует границе несогласия, вызванной нюрманской тектонической фазой, характеризующейся интенсивным рифтогенезом, резкой сменой характера осадконакопления по всей Байкальской территории и быстрым глубоким погружением дна Байкальской впадины [1; 14; 15]. С данной фазой связано изменение характера тектонических напряжений, что привело к изменению структуры отложений – деформированные слои сменились недеформированными (граница между толщами «А» и «В»,

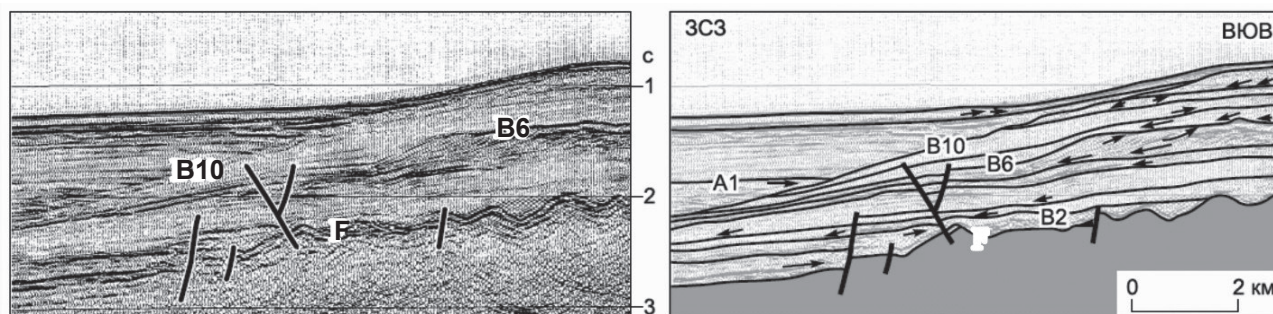


Рис. 8. Фрагмент профиля 58 через южную часть Северобайкальской впадины [36] с изменениями [15]

рис. 4). Данная граница относится к типу несогласия трансгрессивного прилегания [15; 36]. Положение горизонта «B10» подтверждено скважинами BDP-96 и BDP-98 [5].

Сейсмический горизонт «B6» соответствует ольхонской тектонической фазе, разделяющей два этапа развития Байкальского рифта: ранне- и позднеорогенный. За время существования ольхонской тектонической фазы происходил рост рифтовых плеч, о. Ольхон и Святоносского блока [14; 15]. Положение данной границы зафиксировано в самой глубокой на озере Байкал скв. – BDP-98 [1]. Граница «B6» связана с переходом от мелководных фаций к глубоководным мелкозернистым отложениям, связанным с резким увеличением скорости понижения дна Байкала [36]. Данная граница делит сейсмический комплекс «B» на две части: верхняя тонкослоистая пачка (B6–B10), которая формировалась в спокойных озерных условиях, и нижняя пачка (B5–B6), накопление которой осуществлялось в районе дельты палеобаргузина [5].

В осадочных отложениях Байкала был выделен и прослежен сейсмический отражающий горизонт подошвы газогидратного слоя «BSR» (bottom simulating reflectors). Нижняя граница слоя газогидратов определяется изолинией термобарического поля в осадочной толще. Упругие свойства слоя газовых гидратов существенно отличаются от среды ниже подошвы BSR, поэтому на этой границе образуется достаточно мощное отражение, которое имеет отрицательную полярность в связи с наличием свободного газа в подстилающих отложениях. Так как изолиния термобарического поля не всегда совпадает с направлением слоистости в осадках, то такое отражение на временных разрезах может пересекать отражения, связанные с изменением упругих свойств, вызванных литологическими особенностями пород. Граница BSR параллельна дну озера с ее постепенным погружением в сторону увеличения глубины. Данные свойства являются важнейшими признаками отражений от подошвы газовых гидратов по сейсмическим данным [2; 20].

Разрывные нарушения широко развиты в пределах Байкальской природной территории и оказывают существенное влияние на размещение и характер складчатых и магматических структур. Морфологически они представляют собой сбросы,

сбросо-сдвиги и надвиги. Более всего развиты разломы северо-восточного и северо-западного направлений. Среди дизъюнктивных нарушений по их значимости выделяются главные и второстепенные. В составе главных – глубинные разломы, связанные с краевым швом Сибирской платформы, а также основные региональные разломы (Главный Саянский, Тункинский, Темникский, Гильберинский, Южно-Заганский и др.). В бортах тектонических впадин и на участках сочленения крупных блоков они нередко сопровождаются зонами высокотемпературных тектонитов. В геофизических полях им соответствуют резко выраженные градиентные, а на космических снимках линейные зоны. Поэтому при прослеживании горизонтов особое внимание уделялось выявлению разрывных нарушений и их сопоставлению с имеющимися данными о тектоническом строении района работ. В результате, помимо крупных региональных разломов, были выделены контуры предполагаемых локальных разрывных нарушений.

На разрезах, приведенных на рис. 9–12, представлены основные отражающие горизонты, включая: F – кровля дорифтового фундамента (подошва мезо-кайнозойских отложений); B10 – граница несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой; B6 – граница несогласия, возможно, соответствующая ольхонской тектонической фазе; BSR – подошва газогидратного слоя. Дополнительно, на сейсмогеологические разрезы вынесены разрывные нарушения с учетом имеющихся данных о строении района работ по структурно-тектонической карте и генетические характеристики поверхности дна по геоморфологической карте озера Байкал.

Глубинные разрезы построены путем глубинной миграции Кирхгофа временных разрезов по скоростным разрезам. Пример стратиграфической привязки и слежения рассмотренных выше горизонтов по профилю 15 приведен на рис. 12.

Построение структурных карт. Сейсмические данные имеют решающее значение при изучении геологического строения Байкала. Для вычисления глубин залегания отражающих горизонтов (структурных карт) использовался метод пересчета карты изохрон с применением скоростной модели, разработанной А. Я. Гольмштоком [1; 20]. После получения решения в каждом узле

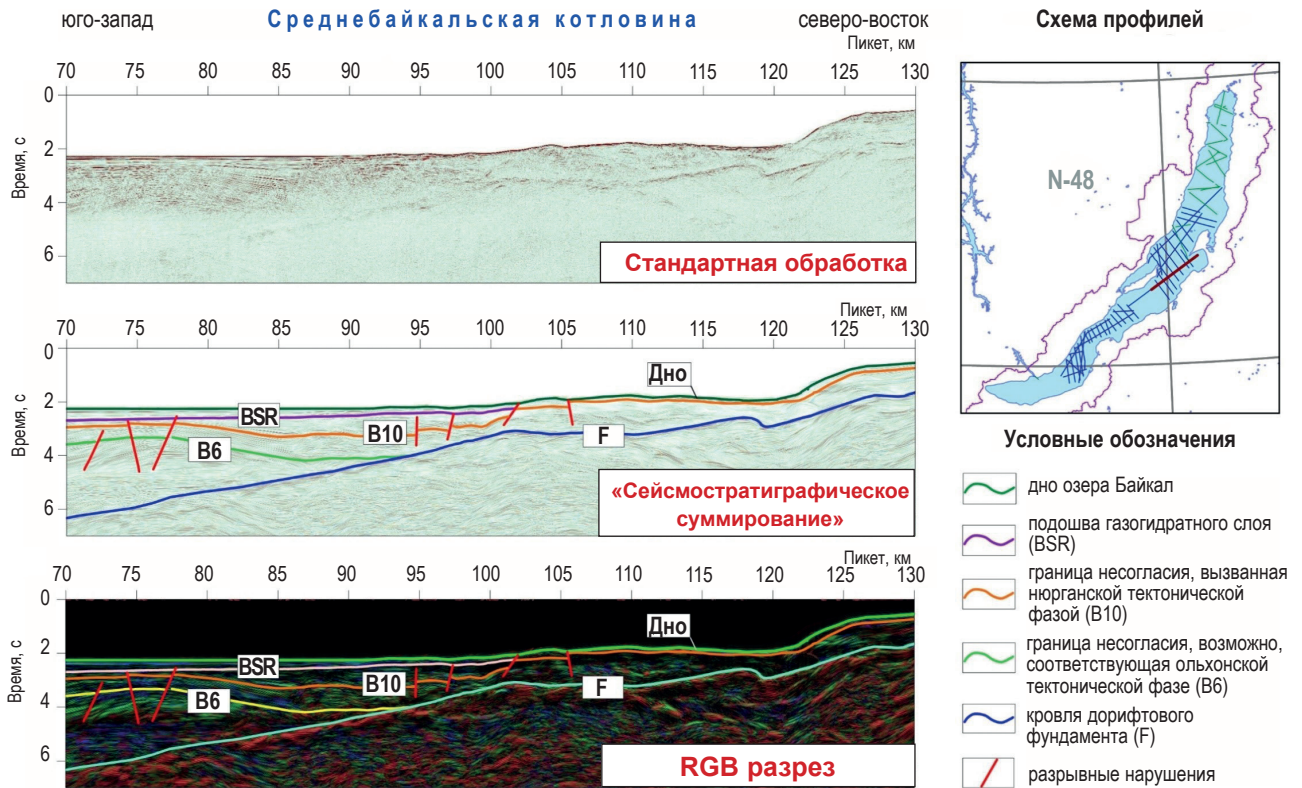


Рис. 9. Сравнение различных вариантов разреза МОВ-ОГТ по профилю 13

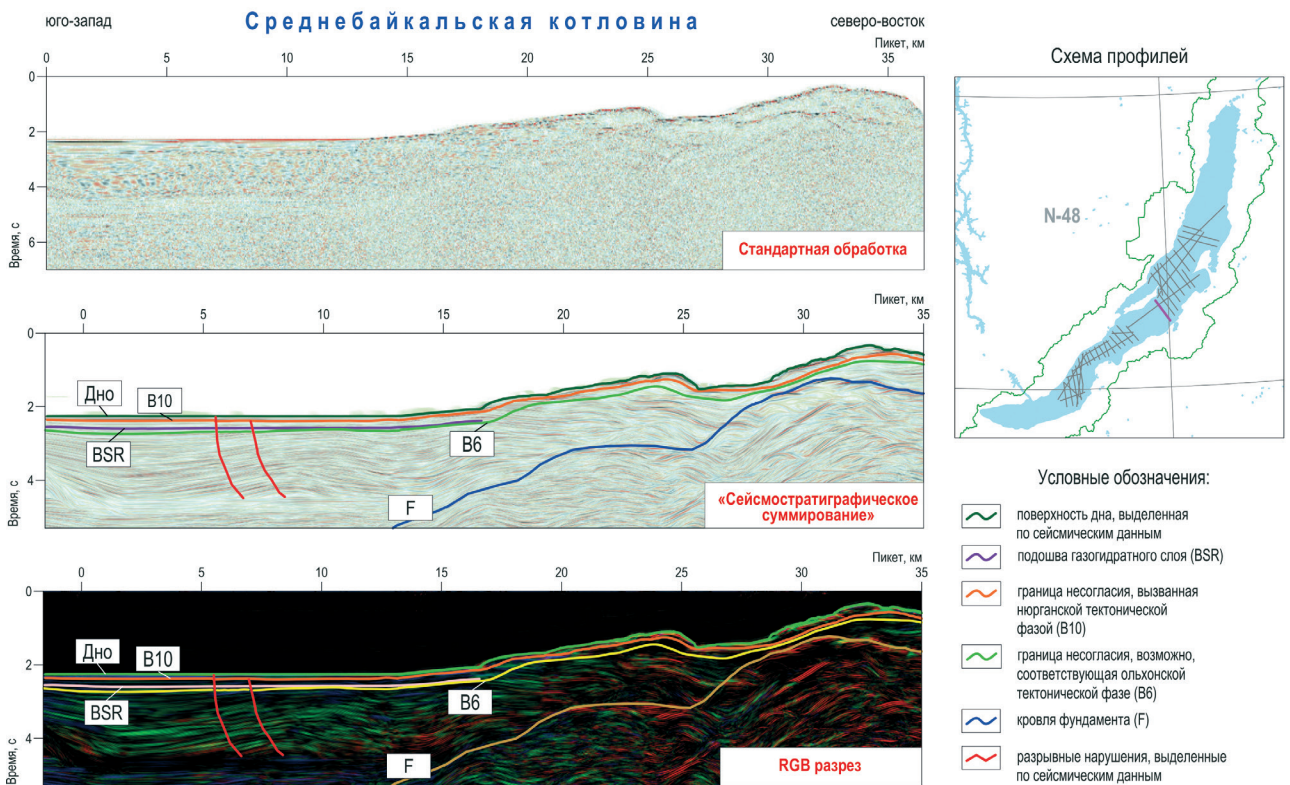


Рис. 10. Сейсмогеологический разрез по профилю 38

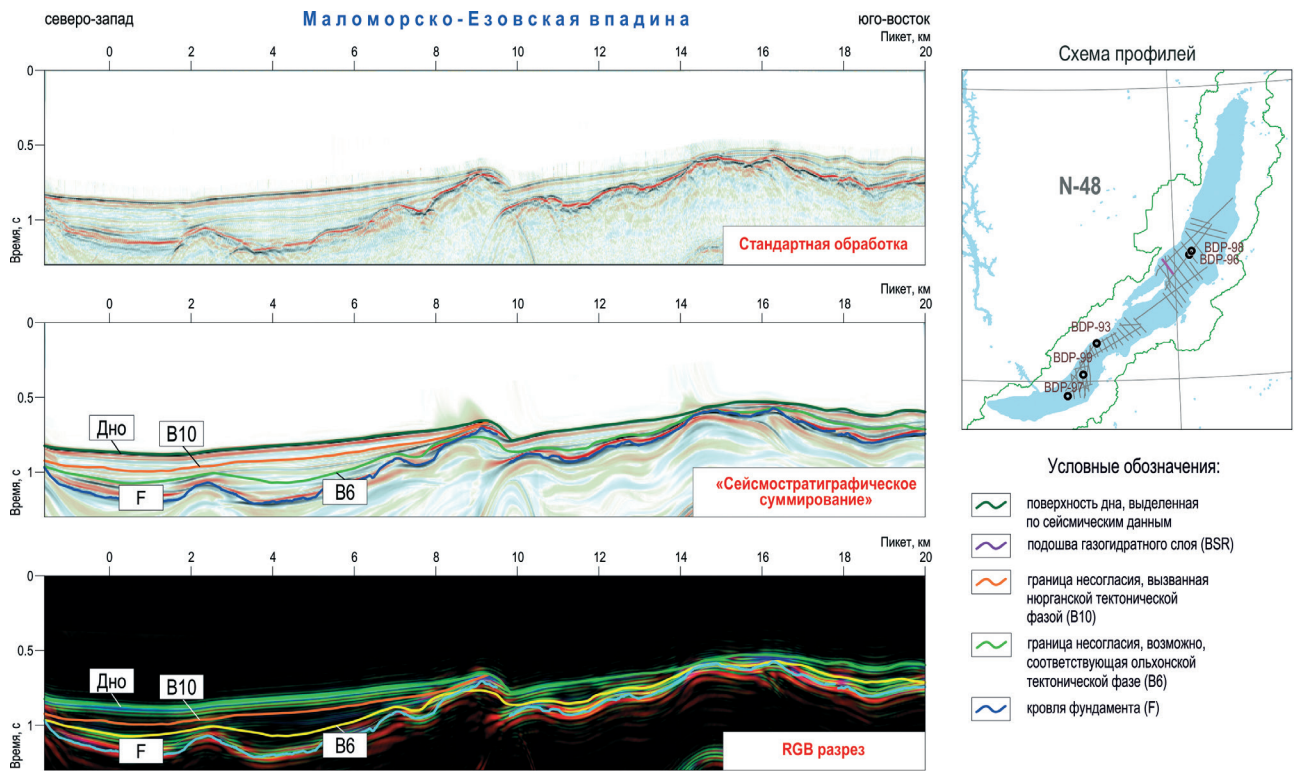


Рис. 11. Сейсмогеологический разрез по профилю 44

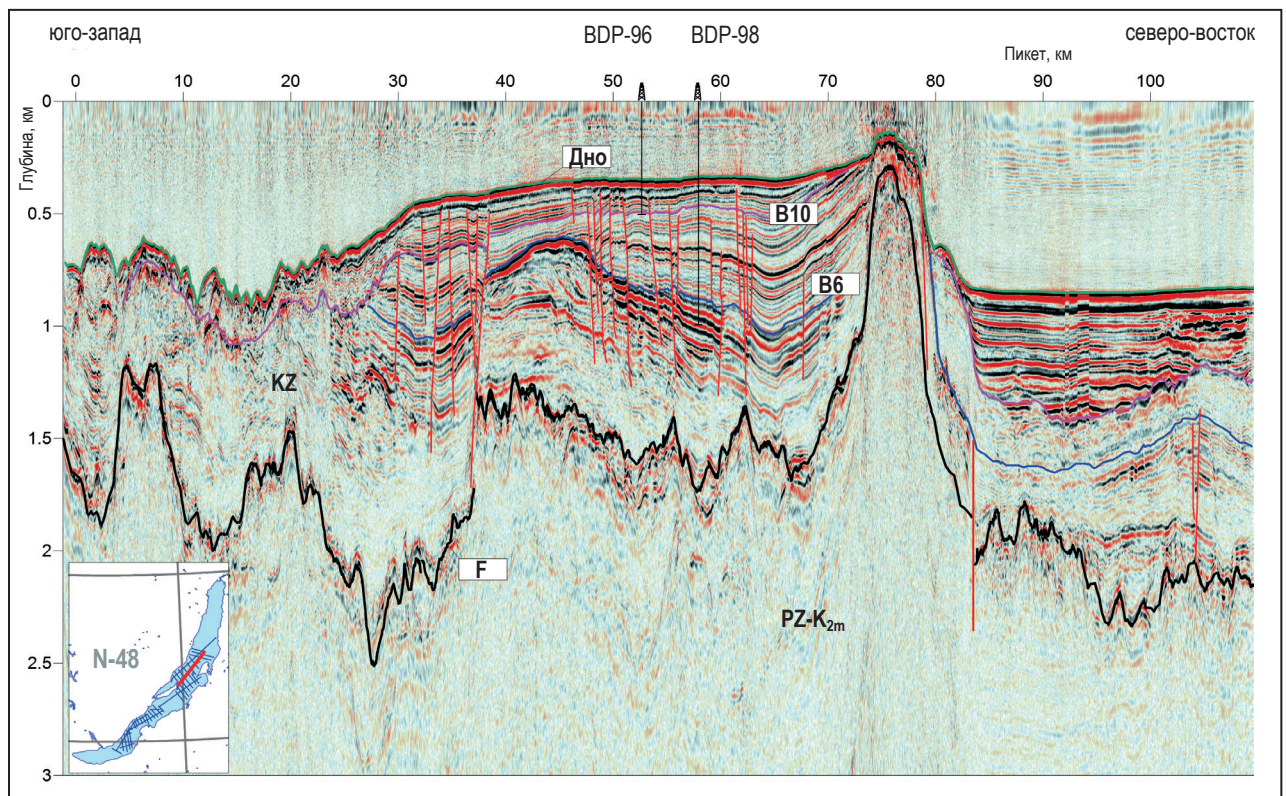


Рис. 12. Слежение и стратиграфическая привязка горизонтов по профилю 15

регулярной сетки карты изохрон вычислялась мощность осадков до границы. Карта прогноза мощности мезо-кайнозойских отложений вычислялась путем разности структурной карты по горизонту «F» и батиметрической карты дна.

Структурные карты по отражающему горизонту «B6», который соответствует ольхонской тектонической фазе, карта по кровле дорифтового фундамента «F» (подошва мезо-кайнозойских отложений) и карта прогноза мощности осадочного чехла озера Байкал, рассчитанные по вышеприведенной методике, представлены на рис. 13–16.

Структурная карта по отражающей границе «B10», соответствующей границе несогласия, вызванного нюрганской тектонической фазой, была дополнена прослеживанием глубинных профилей НСП, выполненных в северной части акватории озера Байкал. На профилях НСП присутствует информация на временах до 2,5 с, в отличие от профилей МОГТ, где длина записи 4 с. При интерпретации разрезов НСП была отслежена наиболее контрастная отражающая граница, условно отождествляемая с отражающим горизонтом «B10». В связи с отсутствием скважин не представилось возможным более точно привязать данную геологическую границу к сейсмической. При построении данной структурной карты была учтена средняя скорость до горизонта «B10», использованная для расчета структурной карты по результатам МОГТ. Актуализированная карта была увязана со структурной картой, полученной по данным МОГТ (рис. 16). В результате впервые была построена структурная карта по границе несогласия, вызванная нюрганской тектонической фазой, практически на всю площадь озера Байкал.

Высокая скорость погружения кристаллического фундамента с одновременным компенсационным накоплением осадков привели к формированию мощной осадочной толщи. Осадки содержат большое количество растительного органического вещества, что при участии процессов катагенеза приводит к образованию и накоплению в них разнообразных углеводородов. В результате сейсмогеологических процессов они, в том числе метан, в свободной или растворенной форме могут в большом количестве мигрировать по проницаемым каналам к поверхности дна озера, что представляет экологическую опасность для водных организмов: нектона, планктона и бентоса, то есть для тех организмов, которые дышат кислородом, растворенным в воде.

Изучение проявлений углеводородов на акватории озера. Всего за период работ (2015–2020 гг.) различными средствами наблюдения на акватории озера нами было зарегистрировано и внесено в электронный каталог 2316 проявлений, связанных с процессами миграции углеводородов. Из них непосредственно выходов углеводородов – 859, выраженных геоморфологически в рельефе дна – 74, проявленных физическими полями – 1465, химических проявлений – 307. Среди них выявлен целый ряд новых объектов, обнаруженных по материалам полевых и каме-

ральных работ, в том числе при анализе космических съемок. Схема дает представление о характере расположения основных объектов в пределах акватории озера (рис. 17).

Наиболее многочисленными объектами миграции углеводородов являются **газопроявления или выходы газа со дна** (грифоны, газовые «факелы») [34]. Всего за время проведения работ зарегистрировано более 800 выходов газа, часть из которых была зафиксирована впервые. Большинство объектов проявлены в толще воды в виде акустических аномалий, которые фиксируются в процессе проведения различных видов эхолотирования. В период стояния ледяного покрова выходы углеводородных газов часто сопровождаются участками чистой воды, так называемыми «пропаринами», или утончением льда. По данным хроматографического анализа, в составе свободных газов на акватории озера преобладает метан. Средняя его концентрация составляет около 50 об.% и может достигать 95 об.%.

Места массовой и активной разгрузки газа изучены с помощью геофизических методов (НСАП, ГЛБО, МПЛЭ). В результате выполненных исследований составлены объемные модели поверхности дна основных объектов миграции углеводородов и районов акватории потенциального их проявления: Посольская банка, пос. Большое Голоустное, губа Таланка – мыс Туркинский, мыс Крестовский и др. Выявлены новые места разгрузки газов (так называемых «сипов») и характер их проявления в пределах водной толщи. Только в пределах Селенгинского мелководья по результатам анализа данных ГЛБО было выявлено более 50 различных объектов.

Анализ структурно-тектонической обстановки, элементов геоморфологии дна озера, разрывной тектоники в комплексе с пространственным расположением источников газа и «пропарин» показывает, что наиболее многочисленные газопроявления расположены на внешней периферии дельты р. Селенга и в ее мелководной зоне, где проявлены тектонические нарушения и отсутствуют породы, экранирующие и перекрывающие проникновение газа в водную толщу. В результате газ мигрирует к поверхности по проницаемым вертикальным зонам, образуя стабильные в пространстве области газовых источников, проявляющиеся в виде многочисленных газовых струй. Многолетние наблюдения показывают, что газовые грифоны часто фиксируются преимущественно в одних и тех же местах. Например, объект с высоким дебитом газа, который располагается на Селенгинском мелководье в точке с координатами 52,1830° с. ш. 106,1177° в. д. и глубиной дна около 40 м наблюдается начиная с 2015 г. (15Б-40, 16Б-70, 17Б-37, 18Б-45, 19Б-1). При этом, все пять лет очаг разгрузки газа сохраняет высокую активность.

На глубинах, доступных для видеоаппаратуры, произведена видео- и фотосъемка дна в районах источников газа. Видеограммы подводных съемок доступны на Информационном сайте о состоянии недр Российской Федерации в разделе «Байкальская природная территория» макета программного

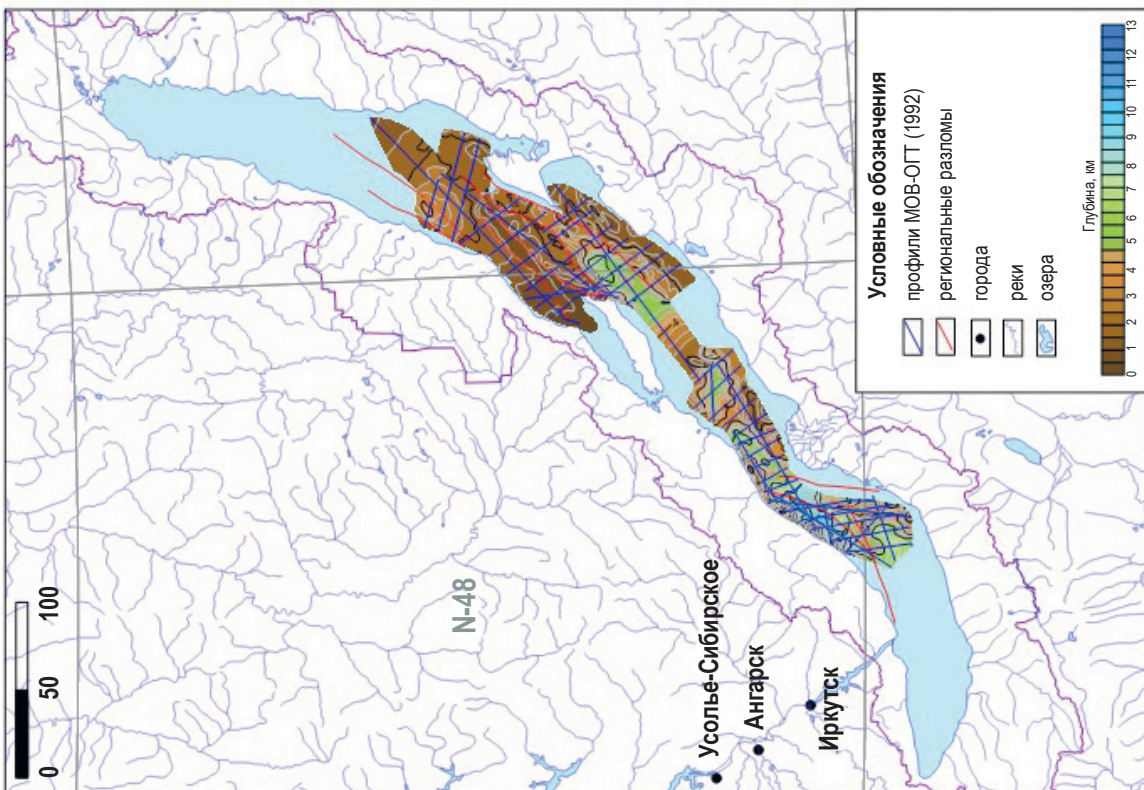


Рис. 14. Структурная карта по кровле дорифтового фундамента озера Байкал

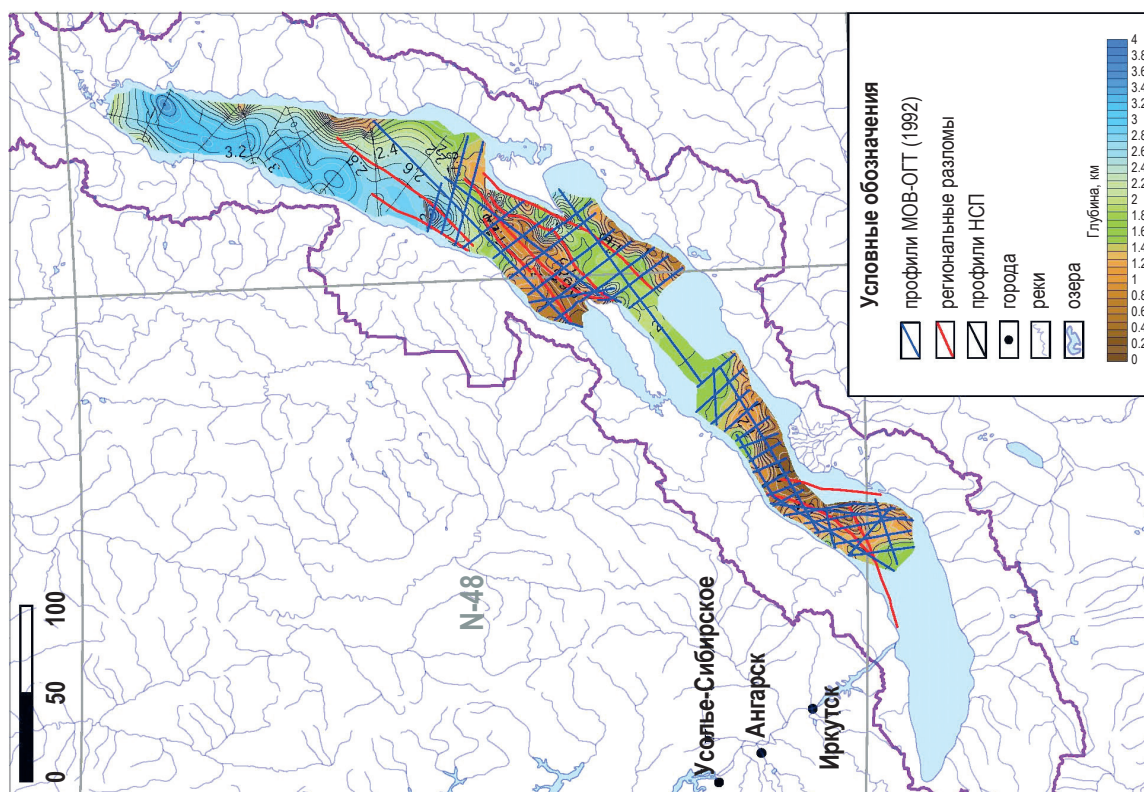


Рис. 13. Структурная карта по отражающему горизонту «В6»

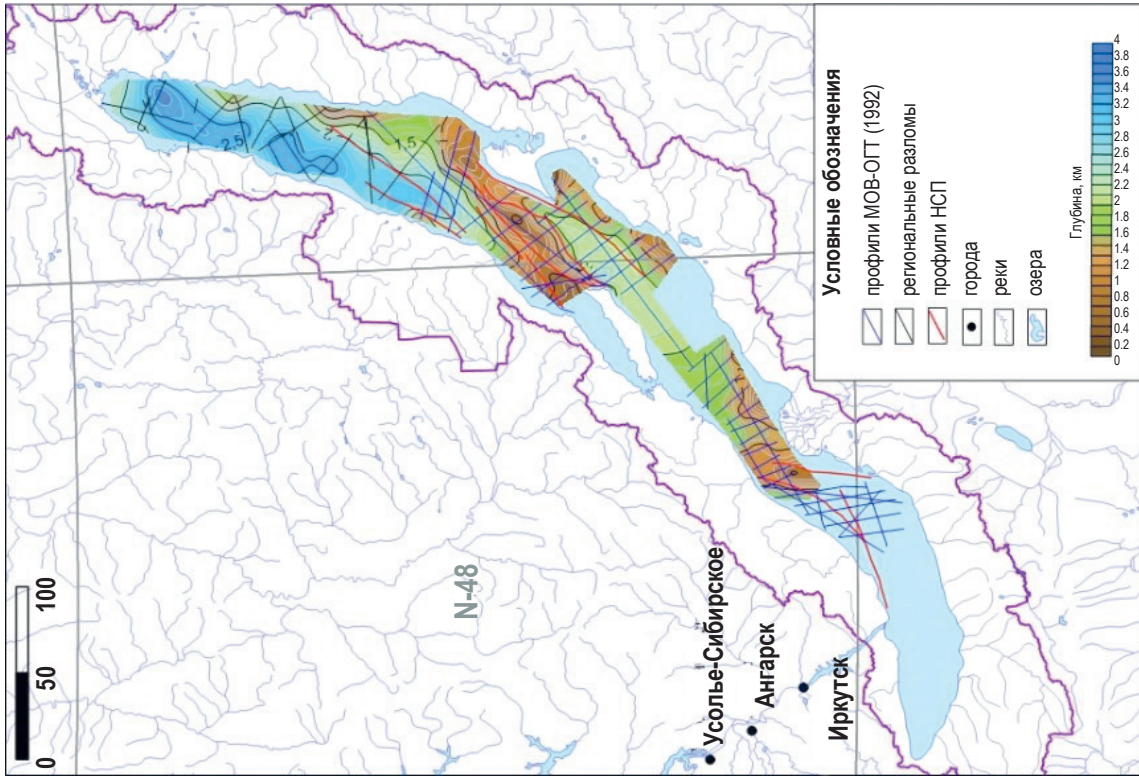


Рис. 16. Структурная карта по отражающему горизонту «В10»

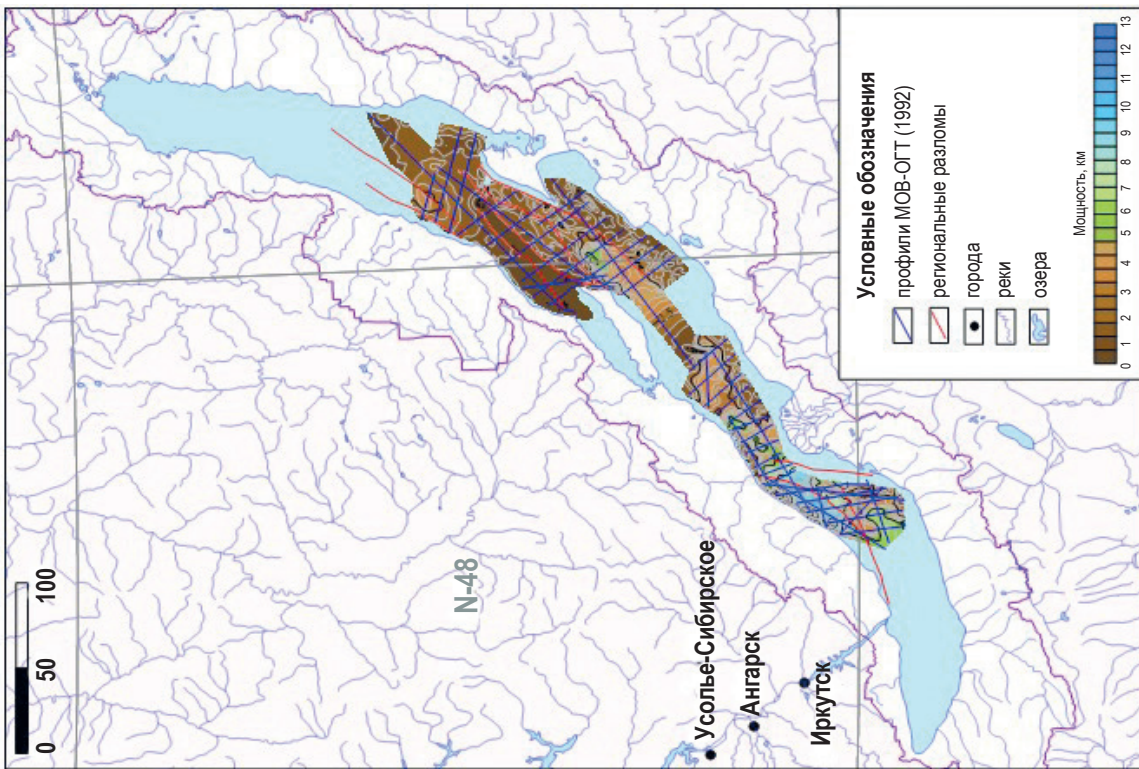


Рис. 15. Карта прогноза мощности мезо-кайнозойских отложений в границах акватории озера Байкал

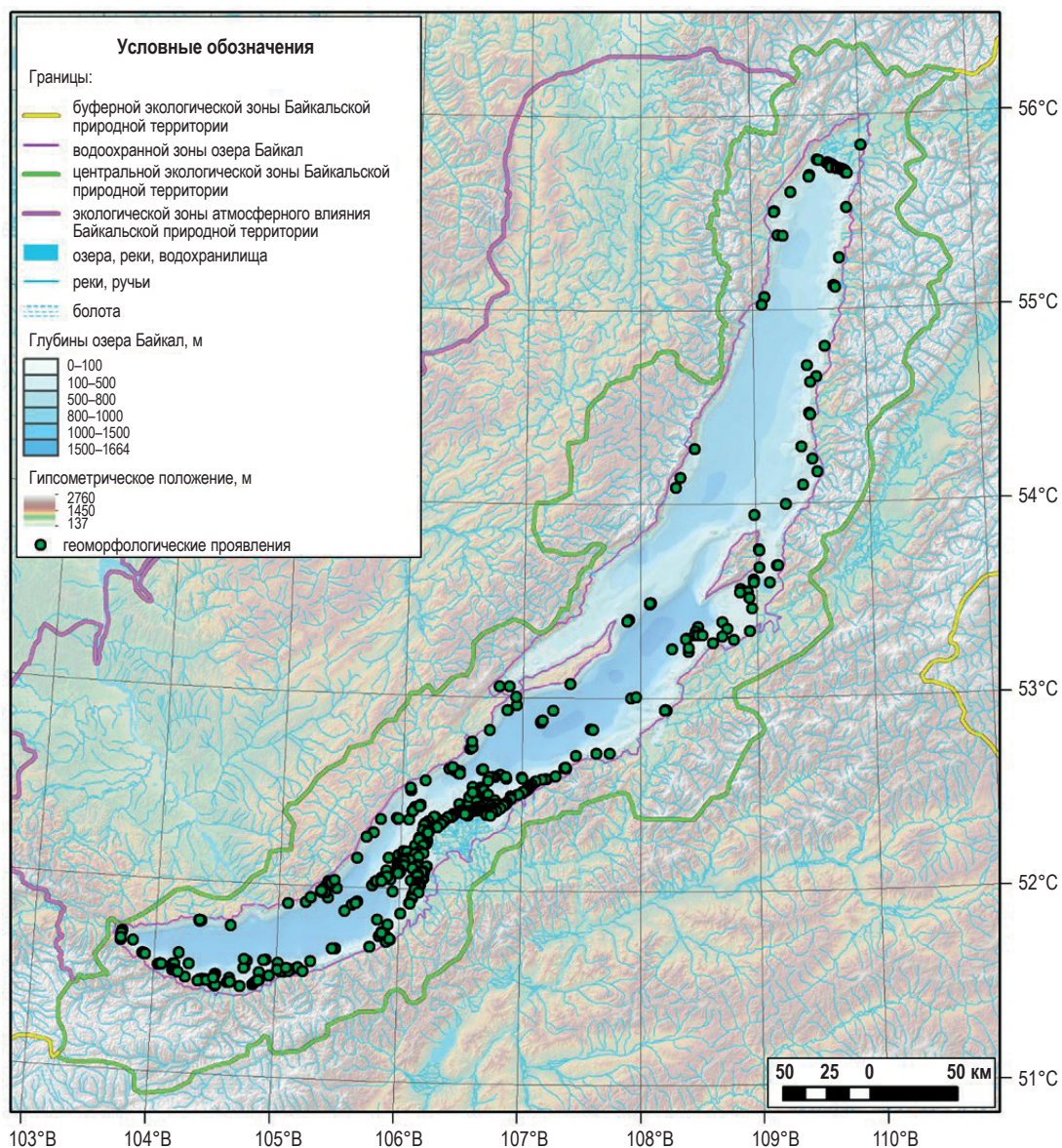


Рис. 17. Схема расположения основных проявлений углеводородов в ЦЭЗ БПТ по результатам полевых работ

модуля информационно-аналитической системы Государственного мониторинга состояния недр.

Еще одним типом газовых проявлений являются объекты, связанные с разрушением газовых гидратов. Все они формируются на больших глубинах и сопровождаются многими выявленными проявлениями газовых гидратов, таких как «Голоустное», «Таланка», «Горевой Утес» и др. При этом высота газового «факела» над уровнем дна достигает 400–500 м и более (рис. 18).

Отрицательное воздействие метана на организмы обусловлено его хорошей растворимостью в воде, что приводит к уменьшению концентрации кислорода и созданию анаэробных условий, не совместимых с жизнью гидробионтов. Масштабное губительное влияние газопоявлений на экосистему озера Байкал не установлено. В то же время отмечены случаи массовой гибели рыб и нерпы, которые могут быть связаны с выбросами

метана [7]. Возможно, существенное увеличение масштабов выхода газа происходит в моменты сильных землетрясений, что приводит к гибели животных и рыб от асфиксии. Кроме того, выделение газа приводит к изменению структуры льда, в результате чего в зимний период над газовыми грифонами уменьшается толщина ледового покрова, а весной образуются многочисленные «пропарины», что приводит к гибели людей и техники.

В то же время, активное функционирование хемо- и фотоавтотрофов в области выходов метана способствует активному образованию биомассы, образующей в экосистеме первый трофический уровень пищевой цепи. Поскольку между первым и последующими уровнями трофической цепи существует положительная корреляция, вполне объяснимой становится высокая продуктивность биоценозов в ряде областей акватории озера Байкал. Следовательно, глубинный метан, с одной

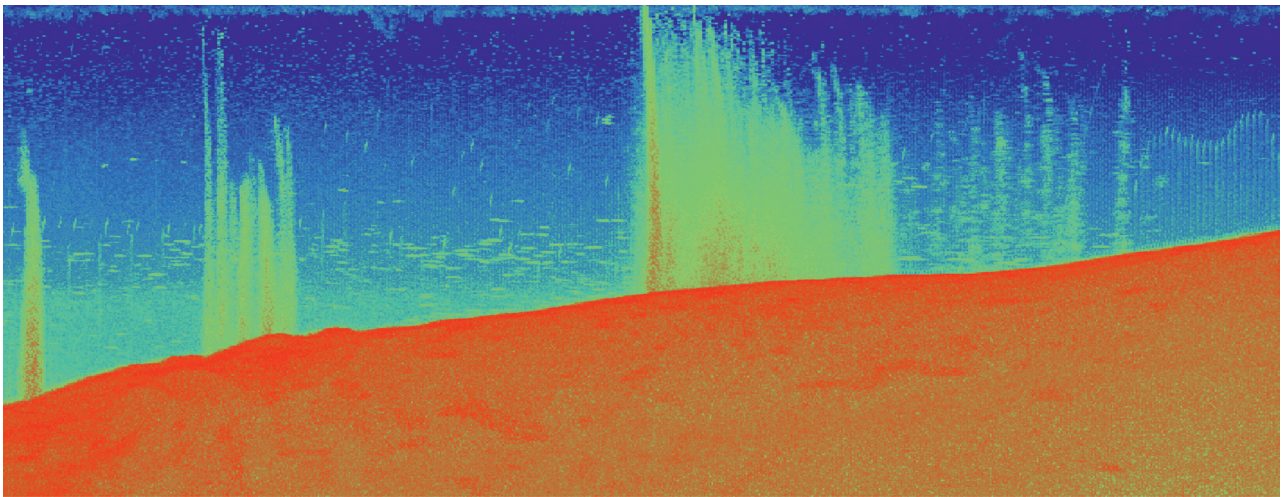


Рис. 18. Вид газовых струй в толще воды по данным многолучевого эхолотирования в районе проявления газовых гидратов Голоустное

стороны, вреден для аэробных организмов, с другой стороны, вносит дополнительный вклад в энергообеспечение, которое лежит в основе разнообразия и, соответственно, устойчивости экосистемы Байкала.

Важнейшими объектами миграции углеводородов для исследований на озере Байкал являются **донные проявления газовых кристаллогидратов**. В последние годы активным их изучением занимаются сотрудники Лимнологического института СО РАН. К настоящему времени в пределах акватории Южной и Центральной котловин ими выявлено более 50 точек, в которых удалось получить керн, содержащий газы гидраты [23; 28; 32].

В ходе экспедиций ФГБУ «ВСЕГЕИ» были изучены 12 наиболее крупных проявлений газовых кристаллогидратов, расположенных в Южной и Центральной котловинах озера Байкал, таких как «Мамай», «Кедровая», «Таланка», «Голоустное», «Маленький», проявление нефти и газовых кристаллогидратов «Горевой Утес» и др. (рис. 19). Гидратсодержащие структуры были исследованы с помощью комплекса геофизических методов (многолучевое эхолотирование и сейсмоакустическое профилирование) и прямых геологических наблюдений. Проведенные работы показали, что большинство проявлений располагается на гребнях межканьонных хребтов при их пересечении неотектоническими нарушениями. Наиболее глубоководные проявления связаны с «газо-вулканическими» структурами, приуроченными к активизированным нарушениям северо-восточного простирания.

На 11 объектах отобраны образцы кристаллогидратов (рис. 20), разных по морфологическим особенностям: массивные выделения, прожилковые и вкрапленные формы. В процессе обработки образцов газовых гидратов получены пробы газа и гидратной воды. Газохроматографический анализ выделенной газовой составляющей гидратов показал, что основным в ее составе является метан. Его доля в среднем составляет 90,7 об.%, и достигает 96 об.%. В небольшом количестве

проб выявлена примесь этана, которая в среднем составляет 0,26 об.%. Гидрохимические исследования состава гидратной воды показали, что относительный коэффициент концентрации элементов в гидратной воде относительно придонной ($[C_g(\text{гв})/C_g(\text{пв})]$), где $C_g(\text{гв})$ – средняя концентрация химического элемента в гидратной воде, а $C_g(\text{пв})$ – средняя концентрация химического элемента в придонной воде), составляет для: Al – 163; La – 141,8; Hf – 129,3; Y – 83,8; Fe – 36,9; Cu – 63,2; Bi – 53,1; Si – 34,3; Pb – 20,4; Cd – 20,1. Кроме того, для таких химических элементов как Li, Be, Mn, Co, Ni, Zn, As, Rb, Ag, W, Bi в отдельных образцах остаточной воды коэффициент концентрации относительно их фона в придонных водах может достигать нескольких десятков и более. Это свидетельствует о возможной активной мобилизации вещества в результате процессов природной миграции углеводородов.

Анализ полученных данных показывает, что источником метана как в донных выходах, так и в газовых кристаллогидратах является метан, образовавшийся в результате преобразования органического вещества, захороненного в многокилометровой толще подбайкальских осадков. Таким образом, весь метан в этих объектах является метаном катогенетическим (то есть термогенным). При этом «материнская» газовая смесь будет содержать и достаточные концентрации других, более тяжелых гомологов метана, в зависимости от степени катогенетического преобразования органического вещества и глубины источника газа. Кроме того, изотопная характеристика углерода, входящего в ее состав, будет достаточно неоднородной (разнообразной). О роли катогенетических процессов в формировании компонентов газового гидрата можно судить и по изотопному составу воды, оставшейся после удаления газовой фазы газового гидрата. Ее изотопные характеристики (от $-109,1$ до $-121,6$ $\text{dD}\text{‰}$ и от $-13,8$ до $14,9$ $\text{d}^{18}\text{O}\text{‰}$, VSMOW) говорят о существенно более тяжелом ее составе по сравнению с «легкими» водами озера

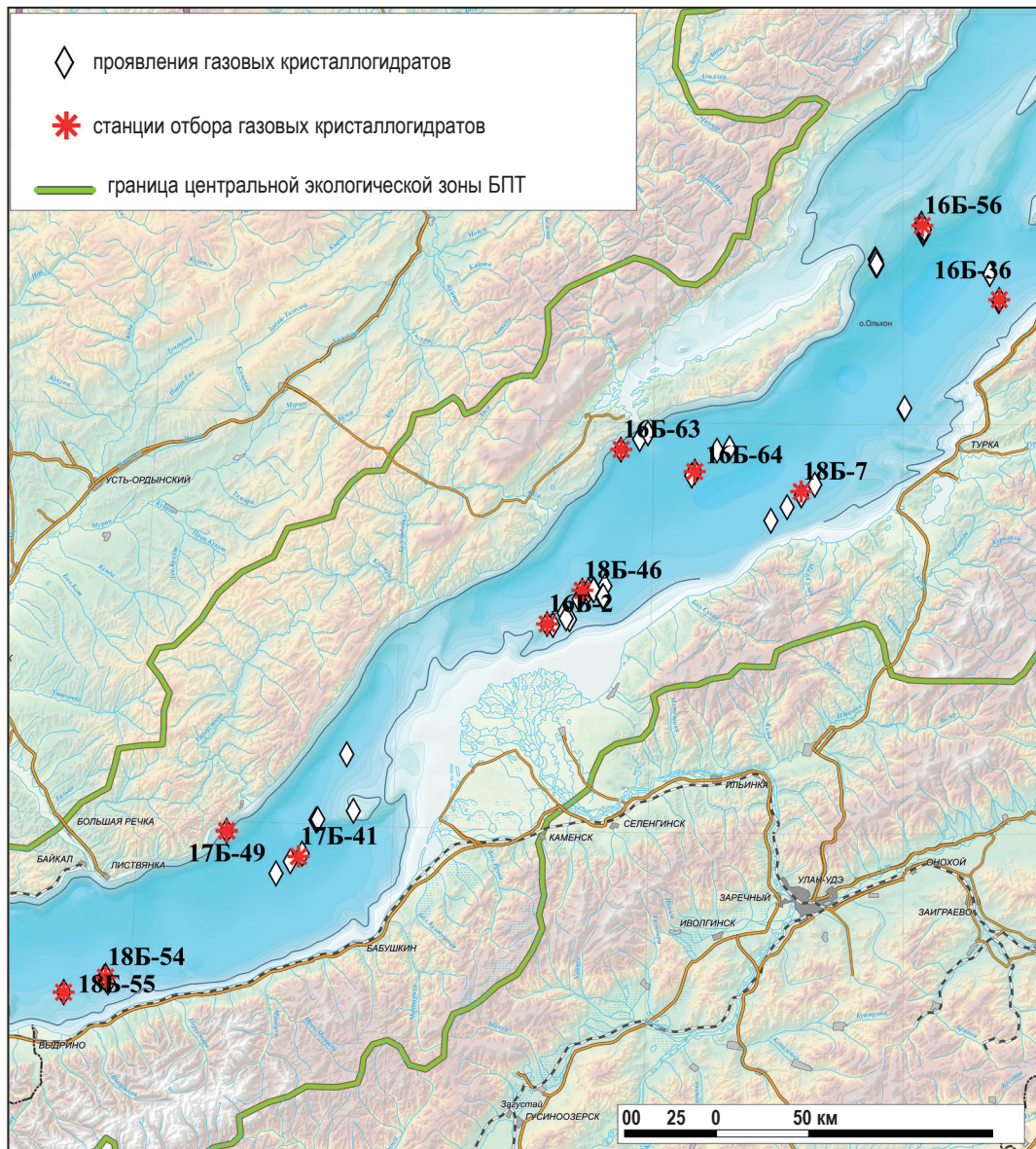


Рис. 19. Схема расположения отбора образцов газовых гидратов в Южной и Центральной котловинах озера Байкал (2016–2019 гг.)

Байкал, которые характеризуются низким содержанием дейтерия и ^{18}O (от -131 до -161 dD‰ и от $-15,9$ до $-20,7$ d ^{18}O ‰, VSMOW) и поэтому не могут рассматриваться в качестве составляющей компоненты при формировании газового кристаллогидрата.

Выходы нефти обнаружены только в акватории Байкала. Наиболее изученные находятся в прибрежной акватории озера севернее зал. Провал, напротив устьев рек Стволовая, Большая и Малая Зеленовская (мыс Толстый), в районе ст. Танхой. На поверхности воды они фиксируются в виде нефтяных slickов, общая площадь которых, по данным дешифрирования космоснимков, составляет около 22 км^2 .

В зимний период нефть встречается в виде капель во льду и в трещинах ледяного покрова.

Нефть, как правило, черная, тяжелая, вязкая. Она характеризуется высокой плотностью ($936,5 \text{ кг/м}^3$) и вязкостью ($40,6 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$), высокой смолистостью ($21,17\%$), низкой сернистостью ($0,32\%$), повышенной концентрацией твердого парафина ($2,77\%$) с высокой температурой плавления ($57 \text{ }^\circ\text{C}$) и высоким содержанием асфальтенов и асфальтогеновых кислот ($8,57\%$). Нефть представлена только высококипящими фракциями ($>200 \text{ }^\circ\text{C}$) и содержит $70,26\%$ углеводородов. В составе последних преобладают насыщенные УВ – $48,14\%$, ароматические – $22,12\%$. О ее происхождении и возрасте мнения исследователей расходятся. Возрастной диапазон колеблется от кембрия (докембрия) до кайнозоя. Описание этой нефти можно встретить с 1928 г. в работах В. Д. Рязанова и др. [15; 21; 23]. Подобная нефть обнаружена сотрудниками ВСЕГЕИ и Сибирского



Рис. 20. Нефть в ковше (ст. 16Б-36: 53,3042° с. ш., 108,3912° в. д.)

филиала «Росгеолфонд» в сентябре 2015 г., но не в озере, а на пляжной гальке.

Совершенно другая нефть обнаружена летом 2005 г. сотрудниками ЛИН СО РАН (г. Иркутск) с НИС «Верещагин». Место выхода нефти расположено в открытом Байкале в 7 км к западу–северо-западу от мыса Горевой Утес (к юго-западу от Баргузинского залива). Однако образцы нефти отобраны не были и исследования ее состава не проводились. В 2016 г. мощное выделение газа и нефти было зафиксировано эхолотом на дне (глубина по эхолоту 895 м) в точке с координатами 53,3042° с. ш., 108,3912° в. д. полевым отрядом ФГБУ «ВСЕГЕИ» (рис. 20). Нефть выходит активно, а на поверхности воды проявляется яркими радужными пленками. Проведенный пробоотбор показал, что нефть и газовые гидраты в разрезе донных отложений находятся совместно. В результате проведенной газовой хроматографии масс-спектрологии образца нефти, отобранной из ковша, определено, что она является продуктом глубокой деградации сырой нефти. На хроматограмме практически полностью отсутствуют пики n-алканов. Основная часть состава относится к неподеленным нафтено-ароматическим соединениям. Масла составляют 82,62 %, смолы суммарно представлены 15,32%, а асфальтены – 2,06%. Среди масел основная доля приходится на мета-

но-нафтеновые УВ – 70,86%, а ароматические УВ – 29,14% (табл. 2).

Анализ изотопно-фракционных кривых углерода образцов нефти, отобранных в разных районах озера Байкал, показал единство их нефтематеринского вещества. По общему изотопному составу углерода байкальская нефть схожа с нефтью районов Азербайджана и Пермского Приуралья, приуроченной к породам мелового и палеозойского возраста соответственно.

Битумы (байкериты) обнаружены на Байкале в начале XX столетия. Нефтяные битумы чаще всего представлены озокеритом, т. е. твердыми метановыми углеводородами. Они найдены на мысе Облом (в северной части залива Провал), вблизи пос. Ключи-Стволовая, в бух. Песчаная, у ст. Танхой. Битумы встречаются редко, в небольших объемах и не содержат вредных веществ. Береговым наземным отрядом ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 2015–2016 гг. битумы были обнаружены в обнажениях углей, песчаников и песков. По своим свойствам они соответствуют тяжелой мальте, переходной к асфальту. Этот битум имеет, несомненно, нефтяную природу, т. е. представляет собой бывшую нефть, потерявшую в результате выветривания легкие дистиллятные фракции, слегка окисленную и, возможно, полимеризованную.

Грязевые вулканы и покмарки. Грязевые вулканы распространены во многих регионах, характеризующихся альпийским тектогенезом. Предположение об их наличии на байкальском дне было сделано В. П. Исаевым в 1998 г. В последующие годы «грязевые» вулканы были обнаружены в Тункинской и Баргузинской впадинах Байкальской рифтовой зоны [10].

Расположение выявленных грязевых вулканов свидетельствует о роли разрывных нарушений в их формировании. Не исключена генетическая связь с ними донных выходов газовых гидратов. Газовый вулканизм на Байкале, безусловно, опасен, прежде всего для людей, населенных пунктов и предприятий, расположенных в прибрежной зоне озера. Возможно, с катастрофическими извержениями горячего газа, которые происходили на озере Байкал в недалеком прошлом, связано и его название.

Таблица 2

Групповой и углеводородный состав нефти со станции 16Б-36

Групповой состав битумоида, вес. %				УВ состав масел, вес. %				Насыщенные УВ/ Ароматические УВ
Масла	Бензолные смолы	Спиртбензолные смолы	Асфальтены	Метано-нафтеновые	Моноароматические	Биароматические	Полиароматические	
82,62	9,91	5,41	2,06	70,86	9,84	6,55	12,75	2,43

Картирование грязевулканических структур имеет важное значение с точки зрения обеспечения безопасности населения и транспортного сообщения по льду озера в зимнее время.

Заключение. Использование современных технологий обработки сейсмических данных позволило повысить информативность сейсмических разрезов и уточнить геологическое строение озера Байкал. Установлены особенности строения осадочного чехла и фундамента: Центральная и Южная котловины Байкала сложены мезо-кайнозойскими осадочными отложениями средней мощностью до 9–10 км и разделены выступами фундамента, контролируемые крупными дизъюнктивными нарушениями; минимальная мощность осадочного чехла (первые сотни метров) наблюдается в районе Академического хребта, максимальная отмечена в юго-западной части внешнего края дельты Селенги; плейстоцен-голоценовый комплекс пород, ограниченный границей несогласия «В10», вызванной нюрганской тектонической фазой, формирует огромную седиментационную ванну мощностью до 3,1 км в Северной котловине озера.

В результате работ был решен ряд важных геологических задач. Выявлены основные региональные закономерности проявления опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ. Создан и постоянно пополняется (актуализируется) электронный каталог проявлений УВ и зон их разгрузки. Кроме непосредственно выходов углеводородов в каталоге зафиксированы в качестве признаков миграции углеводородов следующие виды проявлений:

- геоморфологические проявления в рельефе дна;
- физические проявления в водной среде и на льду (пропарина и их скопления, утончение льда);
- химические проявления в водной среде и донных отложениях (аномальные содержания метана, гомологов метана, непредельных УВ и других химических веществ);
- аномалии быстро меняющихся физико-химических показателей (E_h , pH, УЭП, t°).

Составлен и постоянно обновляется Электронный атлас карт ЦЭЗ БПТ масштаба 1 : 1 000 000 и врезками масштаба 1 : 200 000 с тематическими слоями, отражающими расположение объектов миграции углеводородов. Проведено районирование территории по степени активности процессов, связанных с миграцией углеводородов и выделены следующие районы.

Районы с высокой степенью активности характеризуются постоянно фиксируемым проявлением процессов миграции углеводородов и наличием таких форм проявления, как струи газа, капли нефти, выходящие из поверхности дна, они же в водной толще, нефтяная пленка на поверхности воды, пропарина во льду, капли нефти на поверхности льда. Зоны постоянной разгрузки представляют наибольшую опасность – проваливание под лед людей и автотранспорта, замор рыб и нерпы от асфиксии.

Районы со средней степенью активности характеризуются формами проявления, которые либо эпизодически активны (разгрузка фиксируется 1 раз в несколько лет и реже), либо которые имеют признаки того, что разгрузка происходила когда-либо. Это такие формы проявления, как неактивные в настоящее время грязевые вулканы и эпизодически проявляющиеся кольцевые образования на льду. Зоны эпизодической разгрузки могут представлять опасность только в период активизации процессов миграции углеводородов.

Районы, где отсутствуют активные формы проявления процессов миграции углеводородов, представлены участками, где предполагается или установлено наличие залежей газовых кристаллогидратов, не имеющие признаков активной разгрузки ни в настоящее время, ни в прошлом. На таких участках процессы могут активизироваться и представлять опасность только при катастрофически сильных внешних воздействиях (землетрясения, критическое снижение уровня воды в озере). Достоверных сведений о случаях такой активизации и связанным с этим разрушением газогидратного слоя со значительным объемом разгрузки углеводородных газов, представляющим опасность, в настоящее время нет. Также к этой категории районирования можно отнести участки, на которых к настоящему моменту какие-либо проявления или признаки наличия углеводородов не зафиксированы.

Полученные данные обеспечили повышение степени изученности опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ, что позволило обосновать места размещения пунктов их мониторинга и разработать актуальную программу мониторинга этих опасных процессов.

Большое значение для понимания региональных закономерностей проявления опасных процессов, связанных с природной миграцией углеводородов, имеют геоморфологические исследования и изучение литологического состава донных отложений. В результате этих работ составлены актуальные Геоморфологическая карта дна озера Байкал и Литологическая карта поверхности дна в масштабе 1 : 1 000 000 с детальными врезками для наиболее интересных участков акватории озера.

Комплексные геофизические исследования показали их наибольший эффект при выявлении акустических аномалий, связанных с процессами миграции природных углеводородов на озере Байкал. Таким образом, была подтверждена целесообразность проведения опережающих геофизических исследований, что позволяет выделить перспективные площади для дальнейшего изучения. Кроме того, выявление новых объектов позволило более объективно подходить к анализу их пространственного расположения и условий их формирования и особенностей процессов миграции углеводородов.

Эффективность полученных результатов состоит в получении новых фактических геолого-геофизических и аналитических данных, необходимых для изучения и прогноза опасных геологических

процессов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории с учетом ее особенностей и перспектив социально-экономического развития. Результаты выполненных работ обеспечили повышение степени изученности и прогнозирования опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в ЦЭЗ БПТ.

Авторы выражают благодарность А. Ф. Морозову, без решающей роли которого эти чрезвычайно интересные и практически значимые исследования не были бы осуществлены, за многолетнюю поддержку на всех стадиях выполнения работ, а также сотрудникам Лимнологического института СО РАН, Байкальского Музея Иркутского научного центра СО РАН, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» за участие и помощь в проведении изысканий.

Исследования выполнены в рамках реализации ФГБУ «ВСЕГЕИ» мероприятий ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» по объекту «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией углеводородов в центральной экологической зоне Байкальской природной территории».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидраты метана в осадках озера Байкал / М. И. Кузьмин, Г. В. Калмычков, А. Д. Дучков и др. // Геология рудных месторождений. – 2000. – Т. 42, № 1. – С. 25–37.
2. Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А. Субмаринные газовые гидраты. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. – 199 с.
3. Гриценко С. А. Изображение геологических разрезов и определение скоростей методом общей глубинной точки. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2014. – 120 с.
4. Гриценко С. А., Егорова Н. В. К вопросу о сейсмостратиграфии, мультифокусировании и интерполяции сейсмических разрезов (математический обзор) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2018. – Т. 13, № 2.
5. Десятилетние итоги проекта «Байкал-бурение» / М. И. Кузьмин, Е. Б. Карабанов, Т. Каваи и др. // Геология и геофизика. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. – Т. 42, № 1–2. – 390 с.
6. Ефремова А. Г., Гритчина Н. Д. Газогидраты в морских осадках и проблема их практического использования // Геология нефти и газа. – 1981. – № 2. – С. 32–35.
7. Землетрясение 1912 года на южном Байкале: следы в донных осадках и выброс газа в водную толщу / Е. Г. Вологина, М. Штурм, Я. Б. Радзиминович, С. С. Воробьева, А. А. Щетников // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 12. – С. 1744–1755.
8. Зоненшайн Л. П., Казьмин В. Г., Кузьмин М. Н. Новые данные по истории Байкала: результаты наблюдения с подводных обитаемых аппаратов // Геотектоника. – 1995. – № 3. – С. 46–58.
9. Изучение байкальской рифтовой впадины методом сейсмической томографии на преломленных волнах / С. В. Крылов, В. С. Селезнев, В. М. Соловьев, Г. В. Петрик, И. Ф. Шелудько // Геофизика, Докл. РАН. – 1995. – Т. 345, № 5. – С. 674–677.
10. Исаев В. П. Миграция углеводородов как физико-химический процесс формирования месторождений нефти и газа // Генезис нефти и газа: сб. науч. ст. – М.: ГЕОС, 2003. – С. 129–131.
11. К-Аг датирование палеоценовой коры выветривания в Байкальском регионе / Н. А. Логачев, Л. С. Брандт, С. В. Рассказов, А. В. Иванов, С. В. Брандт, А. А. Конев, А. М. Пясова // Докл. РАН. – 2002. – Т. 385, № 6. – С. 648–650.
12. Коллектив участников проекта «Байкал-бурение». Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал (по результатам исследования 600-метрового керна глубокого бурения) // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41 (1). – С. 3–32.
13. Логачев Н. А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 391–406.
14. Мац В. Д. Байкальский рифт: плиоцен (миоцен) – четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6, № 4. – С. 467–489. DOI:10.5800/GT/2015-6-4-0190.
15. Мац В. Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53, № 9. – С. 1219–1244.
16. Нефтегазоносность отложений озера Байкал / А. Э. Конторович, В. А. Каширцев, В. И. Москвин и др. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1346–1356.
17. О возрасте молассовых толщ Байкальской рифтовой зоны по фауне мелких млекопитающих / О. М. Адаменко, Р. С. Адаменко, В. А. Белова, А. С. Ендрихинский // Среда и жизнь на рубежах эпох кайнозоя в Сибири и на Дальнем Востоке. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 189–193.
18. Особенности строения осадочной толщи оз. Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки (1989 г.) / Д. Р. Хатчинсон, А. Ю. Гольмшток, Л. П. Зоненшайн, Т. К. Мур, К. А. Шольц, К. Д. Клитгорд // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 10–11. – С. 25–36.
19. Отложения Танхойского третичного поля, Южнобайкальская впадина: стратиграфия, корреляция и структурные перестройки в Байкальском регионе / С. В. Рассказов, Н. А. Лямина, И. В. Лузина, Г. П. Черняева, И. С. Чувашова, М. В. Усольцева // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 4. – С. 993–1032.
20. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газовых гидратов / А. Я. Гольмшток, А. Д. Дучков, Д. Р. Хатчинсон и др. // Геология и геофизика. – 1997. – Т. 38, № 10. – С. 1677–1691.
21. Пузырьковые выходы газа из донных отложений / М. М. Макаров, Д. А. Лопаткин, Н. Г. Гранин и др. // Экологический атлас бассейна оз. Байкал. – 2014. – URL: <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas/138-puzyrkovyevyhody-gaza-iz-donnyh-otlozhenii-map> (дата обращения: 18.04.2023).
22. Пуцилло В. Г., Миронов С. И. Нефти, битумы и битуминозные породы района оз. Байкал // Нефти и битумы Сибири. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – С. 7–53.
23. Разломные зоны и поля напряжений в осадках озера Байкал: тектонофизическая интерпретация гидроакустических и геофизических данных / К. Ж. Семиинский, А. В. Черемных, О. М. Хлыстов, Г. Г. Ахманов // Геология и геофизика. – 2022. – № 7. – С. 1016–1034.
24. Самсонов В. В. Происхождение байкальской нефти и проблемы нефтегазоносности Бурятии // Проблемы Сибирской нефти. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. – С. 127–150.
25. Современная геодинамика и гелиогеодинамика: учеб. пособие / К. Г. Леви, Н. В. Задонина, С. А. Язев, В. И. Воронин. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. – 539 с.
26. Суворов В. Д., Мишенькина З. Р. Структура осадочных отложений и фундамента под южной котловиной озера Байкал по данным КМПВ // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1159–1167.
27. Физико-химическая модель образования газовых гидратов с различным структурным типом на грязевом

вулкани К-2 (Кукуйский каньон, озеро Байкал) / А. Ю. Манков, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, А. Г. Огиенко // Геология и геофизика. – 2013. – № 4. – С. 615–626.

28. Хлыстов О. М. Новые находки скоплений газовых гидратов озера Байкал // Четвертая Верещагинская Байкальская конференция. – Иркутск : Изд-во ЛИИ СО РАН, 2005. – С. 208–209.

29. Bottom simulating reflector in Lake Baikal / R. D. Hutchinson, A. J. Golmshtok, C. A. Scholz et al. // EOS. – 1991. – Vol. 72. – P. 307.

30. Brink U. S., Taylor M. H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // Journal of Geophysical Research. – 2002. – Vol. 107, no. 7. – Pp. 2–15.

31. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data / D. R. Hutchinson, A. J. Golmshtok, L. P. Zonenshain, T. C. Moore, C. A. Scholz, K. D. Klitgord // Geology. – 1992. – Vol. 20, iss. 7. – Pp. 589–592. DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2.

32. Gas hydrates in Lake Baikal / O. M. Khlystov, A. V. Khabuev, H. Minami, A. Hachikubo, A. A. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – No. 1. – Pp. 66–70. DOI: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-66 (70556).

33. Kiselev A. I. Volcanism of the Baikal rift zone // Tectonophysics. – 1987. – Vol. 143. – Pp. 235–244.

34. Mats V. D. Late cretaceous and cenozoic stratigraphy of the Baikal Rift sediments // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2013. – Vol. 21, iss. 6. – Pp. 637–651.

35. Mats V. D. The structure and development of the Baikal rift depression // Earth-Science Reviews. – 1993. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 81–118.

36. Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy / T. C. Moore Jr., K. D. Klitgord, A. J. Golmshtok, E. Weber // Geological Society of America Bulletin. – 1997. – Vol. 109, no. 6. – Pp. 746–766.

REFERENCES

1. Kuz'min M. I., Kalmychkov G. V., Duchkov A. D. et al. Gidraty metana v osadkakh ozera Baykal [Methane Hydrates in Lake Baikal Sediments]. *Geology of ore deposits*, 2000, vol. 42, no. 1, pp. 25–37.

2. Ginsburg G. D., Solov'ev V. A. Submarinnye gazovye gidraty [Submarine gas hydrates]. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 1994, 199 p.

3. Gritsenko S. A. Izobrazhenie geologicheskikh razrezov i opredelenie skorostey metodom obshchey glubinnoy tochki [Image of geological sections and determination of velocities by the method of the General depth point]. St. Petersburg, Izdatel'stvo VSEGEI, 2014, 120 p.

4. Gritsenko S. A., Egorova N. V. K voprosu o seismostratigrafii, mull'tifokusirovaniy i interpolyatsii seismicheskikh razrezov (matematicheskii obzor) [On the issue of seismostratigraphy, multifocusing and interpolation of seismic sections (mathematical review)]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2018, vol. 13, no. 2.

5. Kuz'min M. I., Karabanov E. B., Kawai T. et al. Desyatiletnie itogi proekta «Baykal-burenii» [Ten-year results of the Baikal-drilling project]. *Geology and Geophysics*. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2001, vol. 42, no. 1–2, 390 p.

6. Efremova A. G., Gritchina N. D. Gazogidraty v morskikh osadkakh i problema ikh prakticheskogo ispol'zovaniya [Gas hydrates in marine sediments and the problem of their practical use]. *Geology of Oil and Gas*, 1981, no. 2, pp. 32–35.

7. Vologina E. G., Shturm M., Radziminovich Ya. B. et al. Zemletryasenie 1912 goda na yuzhnom Baykale: sledy v donnykh osadkakh i vybros gaza v vodnyuyu tolshchu [1912 earthquake in southern Baikal: traces in bottom sediments and gas release into the water column]. *Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1744–1755.

8. Zonenshain L. P., Kaz'min V. G., Kuz'min M. N. Novye dannye po istorii Baykala: rezul'taty nablyudeniya s podvodnykh obitaemykh apparatov [New data on the history of Baikal: results of observations from underwater manned vehicles]. *Geotectonics*, 1995, no. 3, pp. 46–58.

9. Krylov S. V., Seleznev V. S., Solov'ev V. M. et al. Izuchenie baykal'skoy riftovoy vpadiny metodom seismicheskoy tomografii na prelomlennykh volnakh [Study of the Baikal rift basin by refracted wave seismic tomography]. *Geophysics, Reports of the Academy of Sciences*, 1995, vol. 345, no. 5, pp. 674–677.

10. Isaev V. P. Migratsiya uglevodorodov kak fiziko-khimicheskii protsess formirovaniya mestorozhdeniy nefti i gaza [Migration of hydrocarbons as a physical and chemical process of formation of oil and gas fields]. *The Genesis of Oil and Gas*. Moscow, GEOS, 2003, pp. 129–131.

11. Logachev N. A., Brandt L. S., Rasskazov S. V. et al. K-Ar datirovanie paleotsenovoy kory vyvetrivaniya v Baykal'skom regione [K-Ar dating of the Paleocene weathering crust in Baikalskoe region]. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 385, no. 6, pp. 648–650.

12. Kollektiv uchastnikov proekta «Baykal-burenii». Pozdnekaynozoyckaya paleoklimaticheskaya zapis' v osadkakh ozera Baykal (po rezul'tatam issledovaniya 600-metpovogo kerna glubokogo bureniya) [A team of participants in the Baikal-Burenii project. Late Cenozoic paleoclimatic record in the sediments of Lake Baikal (based on the results of a study of a 600-meter deep drilling core)]. *Geology and Geophysics*, 2000, vol. 41 (1), pp. 3–32.

13. Logachev N. A. Istoriya i geodinamika Baykal'skogo rifta [History and Geodynamics of the Baikal Rift]. *Geology and Geophysics*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 391–406.

14. Mats V. D. Baykal'skiy rift: plitsen (miotsen) – chetvertichnyy epizod ili produkt dlitel'nogo razvitiya s pozdnego mela pod vozdeystviem razlichnykh tektonicheskikh faktorov. Obzor predstavleniy [The Baikal Rift: Pliocene (Miocene) is a Quaternary episode or a product of a long development since the Late Cretaceous under the influence of various tectonic factors. Review of representations]. *Geodynamics and Tectonophysics*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 467–489. DOI:10.5800/GT-2015-6-4-0190.

15. Mats V. D. Vozrast i geodinamicheskaya priroda osadochnogo vypolneniya Baykal'skogo rifta [Age and geodynamic nature of the sedimentary filling of the Baikal Rift]. *Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 9, pp. 1219–1244.

16. Kontorovich A. E., Kashirtsev V. A., Moskvina V. I. et al. Neftegazonosnost' otlozheniy ozera Baykal [Oil and gas potential of Lake Baikal sediments]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 12, pp. 1346–1356.

17. Adamenko O. M., Adamenko R. S., Belova V. A. et al. O vozraste molassovykh tolshch Baykal'skoy riftovoy zony po faune melkikh mlekopitayushchikh [On the age of the molasse sequences of the Baikal rift zone according to the fauna of small mammals]. *Environment and life at the boundaries of the Cenozoic eras in Siberia and the Far East*. Novosibirsk, Nauka, 1984, pp. 189–193.

18. Khatchinson D. R., Gol'mshok A. Yu., Zonenshain L. P. et al. Osobennosti stroeniya osadochnoy tolshchi oz. Baykal po rezul'tatam mnogokanal'noy seismicheskoy s'emki (1989 g.) [Features of the structure of the sedimentary strata of the lake. Baikal according to the results of multichannel seismic survey (1989)]. *Geology and Geophysics*, 1993, vol. 34, no. 10–11, pp. 25–36.

19. Rasskazov S. V., Lyamina N. A., Luzina I. V. et al. Otlozheniya Tankhoyskogo tretichnogo polya, Yuzhnoy baykal'skaya vpadina: stratigrafiya, korrelyatsiya i strukturnyye perestroyki v Baykal'skom regione [Deposits of the Tankhoi tertiary field, South Baikal depression: stratigraphy, correlation and structural changes in the Baikal region]. *Geodynamics and geotectonics*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 993–1032.

20. Gol'mshok A. Ya., Duchkov A. D., Khatchinson D. R. et al. Otsenki teplovogo potoka na ozere Baykal po seismicheskim dannym o nizhney granitse sloya gazovykh

gidratov [Estimates of the heat flow at Lake Baikal based on seismic data on the lower boundary of the gas hydrate layer]. *Geology and Geophysics*, 1997, vol. 38, no. 10, pp. 1677–1691.

21. Makarov M. M., Lopatkin D. A., Granin N. G. et al. Puzyr'-kovye vykhody gaza iz donnykh otlozheniy [Bubble outcrops of gas from bottom sediments]. *Ecological Atlas of Lake Baikal Basin*, 2014, URL: <http://bic.iwlearn.org/ru/atlas/atlas/138-puzyrkovye-vyhody-gaza-iz-donnykh-otlozheniy-map> (18.04.2023).

22. Putsillo V. G., Mironov S. I. Nefti, bitumy i bituminoznye porody rayona oz. Baykal [Oil, bitumen and bituminous rocks of the lake area. Baikal]. *Oils and Bitumens of Siberia*. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1958, pp. 7–53.

23. Seminskiy K. Zh., Cheremnykh A. V., Khlystov O. M. et al. Razlomnye zony i polya napryazheniy v osadkakh ozera Baykal: tektonofizicheskaya interpretatsiya gidroakusticheskikh i geofizicheskikh dannykh [Fault zones and stress fields in Lake Baikal sediments: tectonophysical interpretation of hydroacoustic and geophysical data]. *Geology and Geophysics*, 2022, no. 7, pp. 1016–1034.

24. Samsonov V. V. Proiskhozhdenie baykal'skoy nefti i problemy neftegazonosnosti Buryatii [Origin of Baikal oil and problems of oil and gas potential in Buryatia]. *Problems of Siberian oil*. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO AN SSSR, 1963, pp. 127–150.

25. Levi K. G., Zadonina N. V., Yazev S. A. et al. Sovremennaya geodinamika i geliogeodinamika: ucheb. posobie [Modern geodynamics and heliogeodynamics: proc. allowance]. Irkutsk, IGU publishing house, 2012, 539 p.

26. Suvorov V. D., Mishen'kina Z. R. Struktura osadochnykh otlozheniy i fundamenta pod yuzhnoy kotlovinoy ozera Baykal po dannym KMPV [The structure of sedimentary deposits and the basement under the southern basin of Lake Baikal according to the data of the KMPV]. *Geology and Geophysics*, 2005, vol. 46, no. 11, pp. 1159–1167.

27. 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) [Physico-chemical model of the formation of gas hydrates with different structural types on the K-2 mud volcano (Kukui Canyon, Lake Baikal)]. *Geology and Geophysics*, 2013, no. 4, pp. 615–626.

28. Khlystov O. M. Novye nakhodki skopleniy gazovykh gidratov ozera Baykal [New finds of accumulations of gas hydrates in Lake Baikal]. *The Fourth Vereshchagin Baikal Conference*. Irkutsk, publishing house LIN SO RAN, 2005, pp. 208–209.

29. Hutchinson R. D., Golmshtok A. J., Scholz C. A. et al. Bottom simulating reflector in Lake Baikal. *EOS*, 1991, vol. 72, p. 307.

30. Brink U. S., Taylor M. H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting. *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. B7, pp. 2–15.

31. Hutchinson D. R., Golmshtok A. J., Zonenshain L. P. et al. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data [Electronic resource]. *Geology*, 1992, vol. 20, iss. 7, pp. 589–592, DOI: 10.1130/0091-7613(1992)020<0589:DATFOT>2.3.CO;2.

32. 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, DOI: 10.31951/2658-3518-2018-A-1-66 (70556).

33. Kiselev A. I. Volcanism of the Baikal rift zone. *Tectonophysics*, 1987, vol. 143, pp. 235–244.

34. Mats V. D. Late cretaceous and cenozoic stratigraphy of the Baikal Rift sediments. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2013, vol. 21, iss. 6, pp. 637–651.

35. Mats V. D. The structure and development of the Baikal rift depression. *Earth-Science Reviews*, 1993, vol. 34, iss. 2, pp. 81–118.

36. Moore Jr. T. C., Klitgord K. D., Golmshtok A. J. et al. Sedimentation and subsidence patterns in the central and north basins of Lake Baikal from seismic stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, vol. 109, no. 6, pp. 746–766.

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Ларичев Андрей Иванович – канд. геол.-минерал. наук, зам. ген. директора, ВСЕГЕИ¹. <Andrey_Larichev@vsegei.ru>

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Брылина Анастасия Владимировна – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹.

<Anastasiya_Brilina@vsegei.ru>

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

Дронь Олег Владимирович – инженер 1-й категории, ВСЕГЕИ¹. <Oleg_Dron@vsegei.ru>

Исаев Виктор Петрович – доктор геол.-минерал. наук, гл. геолог, ООО «Байкальский центр»². <isaevvp@yandex.ru>

Кичигин Андрей Геннадьевич – инженер, ООО «Байкальский центр»². <kag38rus@gmail.com>

Лыгин Алексей Михайлович – начальник отдела, Гидроспецгеология³. <info@specgeo.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI¹. <OPetrov@vsegei.ru>

Larichev Andrey Ivanovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy General Director, VSEGEI¹.

<Andrey_Larichev@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹.

<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>

Brylina Anastasiya Vladimirovna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹.

<Anastasiya_Brilina@vsegei.ru>

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

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

Isaev Viktor Petrovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Geologist, Baikal Center LLC².

<isaevvp@yandex.ru>

Kichigin Andrey Gennadevich – Engineer, Baikal Center LLC². <kag38rus@gmail.com>

Lygin Aleksey Mikhaylovich – Head of Department, Gidrospetsgeologiya³. <info@specgeo.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.
- ² ООО «Байкальский центр». Ул. Декабрьских Событий, 29, Иркутск, Россия, 664007.
Baikal Center LLC. 29 Ul. Dekabr'skikh Sobytiy, Irkutsk, Russia, 664007.
- ³ Гидроспецгеология. Ул. Маршала Рыбалко, 4, Москва, Россия, 123060.
Gidrospetsgeologiya. 4 Ul. Marshala Rybalko, Moscow, Russia, 123060.