

УДК 550.84.09

**О.Н. Видищева¹, Г.Г. Ахманов², М.А. Соловьева³, А. Мащини⁴,
О.М. Хлыстов⁵, Е.Д. Егошина⁶, А.А. Кудяев⁷, Д.В. Корост⁸,
Е.Н. Полудеткина⁹, Н.В. Морозов¹⁰, К.А. Григорьев¹¹**

ОСОБЕННОСТИ РАЗГРУЗКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ ВДОЛЬ РАЗЛОМА ГИДРАТНЫЙ (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ООО «Деко-геофизика», 119992, Москва, Научный парк МГУ, Ленинские Горы, 1-77

Университет Осло (Норвегия), Центр эволюции Земли и динамики, 0316, Осло, Сем Саеландсвей 2А, Блиндерн

ООО «Газпромнефть НТЦ», 190000, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 75-79, лит. Д

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

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Институт высоких технологий,

664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

LLC “Deco-Geophysical”, 119992, Moscow, Science Park, Leninskiye Gory, 1-77

University of Oslo, Centre for Earth Evolution and Dynamics (CEED), 0316, Oslo, Sem Sælands vei 2A, Blindern

LLC “Gazpromneft Sienese & Technology Centre”, 190000, St Petersburg, Moika River emb., 75–79 liter D

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

Irkutsk National Research Technical University, 664074, Irkutsk, Lermontov str., 83

Разлом Гидратный, протягивающийся на 60 км с юго-запада на северо-восток в центральной котловине оз. Байкал, контролирует положение зон выхода углеводородных газов на поверхность дна, многие из которых гидратоносны. В ходе экспедиции Class@Baikal-2019 были отобраны пробы газов из донных осадков вдоль разломной зоны, изучены их молекулярные и изотопные свойства. Выявлено, что разлом — проводящий, и по нему происходит миграция флюидов из глубоких горизонтов осадочного выполнения оз. Байкал. Наиболее интенсивная разгрузка газов установлена в центральном и северо-восточном сегментах разлома, в районах структур МГУ, Новосибирск и Ухан. В пределах этих структур зафиксирована максимальная концентрация газов в осадках, утяжеленный изотопный состав углерода метана (–57‰ VPDB), присутствовали компоненты C₂₊, обнаружены приповерхностные скопления газовых гидратов. В юго-западном сегменте разлома отмечена наименьшая концентрация газов в осадках, а метан характеризовался легким изотопным составом углерода (–76‰ VPDB).

Установлено, что концентрация метана и его гомологов в приповерхностных отложениях, а также изотопные характеристики углерода метана отражают превалирование одного из способов миграции газа (фильтрация или диффузия) в верхних частях разреза. Диффузия и рассеивание термогенных газов в верхних частях разреза наряду с существенным вкладом микробиального метана в придонную разгрузку характерны для участков, где разлом погребен под относительно мощными современными осадками.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, аспирант; Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, геохимик; e-mail: vid6877@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, доцент; Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, директор; e-mail: akhmanov@geol.msu.ru

³ ООО «Деко-Геофизика», геофизик; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, геофизик; e-mail: marina-sol@yandex.ru

⁴ Университет Осло (Норвегия), Центр эволюции Земли и динамики, вед. науч. с.; e-mail: adriano.mazzini@geo.uio.no

⁵ Лимнологический институт СО РАН, лаборатория геологии оз. Байкал, и.о. зав. лабораторией; e-mail: oleg@lin.irk.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, студент; Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, геохимик; e-mail: ksa_100@bk.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, геолог; e-mail: a.a.kudayev@gmail.com

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, науч. с.; e-mail: dkorost@mail.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии горючих ископаемых, ст. науч. с.; e-mail: poludetkinaelena@mail.ru

¹⁰ ООО «Газпромнефть НТЦ», эксперт; e-mail: morozov.NV@gazpromneft-ntc.ru

¹¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Институт высоких технологий, кафедра радиоэлектроники и телекоммуникационных систем, аспирант; отдел информационно измерительных систем, электроник; e-mail: gka_1986@mail.ru

Фокусированный подток газа и его разгрузка типичны для районов, где разлом выходит на дно озера и хорошо выражен в донном рельефе. Предложены две типовые модели миграции углеводородных газов к поверхности, объясняющие наблюдаемые газогеохимические характеристики донных илов. Результаты исследований могут помочь в совершенствовании методики и подходов к интерпретации данных геохимических съемок при поиске скоплений углеводородов на акваториях.

Ключевые слова: оз. Байкал, газогеохимические исследования, донные осадки, газовые гидраты, зоны фокусированной разгрузки, грязевые вулканы, миграция газов, тектонические нарушения, сейсмоакустическое профилирование.

The Gydratny Fault, extending in SW-NE over 60 km, is situated in the central basin of Lake Baikal. This fault governs a distribution of hydrocarbon gas discharge zones on the lake bottom, many of them are hydrate-bearing. During the Class@Baikal-2019 expedition gas samples were obtained from bottom sediments along the fault zone, molecular and isotopic properties of the gases were studied. It is concluded that the fault zone is permeable for hydrocarbons and serves as an important fluid flow conduit from deep sources to the surface. The most intensive gas seepage was determined along the central and north-eastern segments of the fault zone where it is associated with the MSU hydrate-bearing structure and the Novosibirsk and Ukhon mud volcanoes. Within these structures the highest concentrations of methane and C_{2+} components were detected, the heaviest isotopic composition of methane carbon (-57‰ VPDB) were identified and near-surface gas hydrate accumulations were observed. The south-western segment of the fault is characterized by the lowest concentrations of gases in sediments with light carbon isotopic composition of methane (-76‰ VPDB).

A dominant gas migration mechanism (advection or diffusion) in the upper part of the basin sedimentary section conditions the registered concentrations of methane and its homologues in sediments and their carbon isotopic composition. Diffusion and dispersion of migrated thermogenic gases and significant portion of microbial methane in seeping gases are characteristic for the areas where the fault is buried under relatively thick modern sediments. Focused gas migration followed by its focused discharge are specific for the areas where the fault propagates to the lake floor and is well-expressed in a bottom relief. Two models of hydrocarbon gases migration to the surface explaining the observed gas-geochemical characteristics of bottom sediments are described and discussed. Obtained results can help in enhancing interpretation of data of gas geochemical prospecting for offshore oil and gas.

Key words: Lake Baikal, gas geochemical studies, bottom sediments, gas hydrates, seepages, mud volcanoes, gas migration, tectonic faults, seismic and acoustic profiling.

Введение. Байкал — озеро тектонического происхождения — часть Байкальской внутриконтинентальной рифтовой зоны. Внутреннее строение байкальской впадины осложнено большим количеством разломов. Они отмечены и на глубинных сейсмических профилях [Hutchinson et al., 1992; Levi, 1995; Логачев, 2003] и прослеживаются на данных приповерхностной сейсмоакустики [Solovyeva et al., 2020]; данные проекта Class@Baikal. Котловина озера в поперечном сечении представляет собой асимметричную впадину с весьма крутым западным и относительно пологим восточным бортами. На дне озера известны многочисленные выходы метана, распространены скопления газовых гидратов [Khlystov et al., 2018], обнаружены природные излияния нефти, битумные постройки [Пуцилло, Миронов, 1958; Самсонов, 1963; Каширцев и др., 2006; Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2009, Горшков и др., 2010]. Интенсивные газогеохимические исследования донных осадков в южной и центральной глубоководных котловинах озера ведутся с 2014 г. в рамках совместного проекта Class@Baikal геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ЛИН СО РАН [Ахманов и др., 2019].

В осадках озера обнаружен метан двух генетических типов: микробный и термогенный

[Гранин, Гранина, 2002; Калмычков и др., 2006, 2017; Nachikubo et al., 2010]. Кроме того, для термальных источников, обнаруженных в некоторых районах на побережье озера, характерны выбросы метана абиогенного происхождения [Калмычков и др., 2006].

Мощность осадочного выполнения в центральной котловине озера оценивается в 7,5–8 км [Hutchinson et al., 1992; Мац и др., 2001]. Бассейн считается нефтегазоносным [Конторович и др., 2007]. Согласно современным представлениям нефтегазоматеринскими для углеводородов Байкала могут служить кайнозойские отложения, а наиболее вероятная величина начальных геологических ресурсов оценивается в 500 млн т сгенерированных условных углеводородов [Конторович и др., 2007; Хлыстов и др., 2007]. Природа регионального флюидоупора, как и его наличие в осадочной толще Байкала остаются дискуссионными. Локальными флюидоупорами, скорее всего, могут быть существенно глинистые горизонты, накопившиеся в ходе неоген-четвертичной геологической эволюции байкальской впадины. Пути миграции катагенетических углеводородов (прежде всего термогенного газа) из зон их генерации и/или аккумуляции к поверхности обеспечены широко проявленными

здесь дизъюнктивными нарушениями осадочного чехла.

В то же время условия в верхней части байкальского разреза благоприятствуют активному микробиальному метаногенезу, в результате чего газонасыщенность приповерхностных илов формируется за счет метана разного происхождения. Таким образом, на газогеохимические характеристики донных отложений совокупно влияют неотектонические процессы и современное осадконакопление в пределах отдельных участков озера. Исследование особенностей такого влияния представляется важной фундаментальной задачей изучения Байкала, а также имеет ряд общих прикладных аспектов для совершенствования методики и подходов к интерпретации данных газогеохимических съемок при поиске скоплений углеводородов.

В июне-июле 2019 г. Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с ЛИН СО РАН и при участии Научного центра эволюции и динамики Земли (г. Осло, Норвегия) организовал экспедицию на НИС «Г.Ю. Верещагин» для проведения комплексных геолого-геофизических и геохимических исследований в рамках международных проектов Class@Baikal и HotMud. Одной из задач экспедиции было изучение процессов флюидоразгрузки в зоне разлома Гидратный. Материалы экспедиции и результаты последующих лабораторных исследований позволили существенно детализировать представления об источниках углеводородных газов и особенностях тектонического и литологического контроля их миграции в верхней части осадочного выполнения глубоководной котловины Байкала.

Район исследований. Разлом, получивший название Гидратный [Хлыстов, 2018], расположен в центральной котловине оз. Байкал и протягивается более чем на 60 км с северо-востока на юго-запад (рис. 1). Разлом хорошо выражен в рельефе дна и представляет собой сброс с висячим крылом (юго-восточным), опущенным до 100 м относительно лежащего крыла (северо-западного). Уступ разлома делит западную часть средней котловины Байкала на две части, соответствующие двум крупным тектоническим блокам с характерными тектоническими режимами. Опущенный блок характеризуется наличием множества относительно мелких и локально распространенных нарушений, сопутствующих главному разлому. Некоторые из них активные и достигают поверхности дна, а другие погребены под толщей ненарушенных отложений (рис. 1) [Solovyeva et al., 2020]. Погребенные разломы в основном расположены в юго-западной части района исследований. Здесь они, вероятно, перекрыты наносами авандельты и проксимальной части конуса выноса р. Селенга, поставляющей

большое количество терригенного материала в озеро. На северо-востоке влияние твердого стока р. Селенга существенно ослабевает, а прочие поставщики терригенного материала в котловину озера менее существенны, так как представлены лишь небольшими, часто сезонными, водотоками. В северо-восточной части района исследований снос с суши практически отсутствует, в связи с чем разломы не перекрыты отложениями и в большинстве случаев выходят на поверхность дна.

С разломом Гидратный связано множество закартированных фокусированных выходов метана на поверхность дна, а также ассоциированы скопления придонных газовых гидратов [Khlystov et al., 2018]. Все активные в настоящее время структуры расположены в северо-восточном сегменте разлома Гидратный. Это структуры выхода газа, отчетливо выраженные в рельефе дна: структура МГУ, грязевые вулканы Новосибирск и Ухан (рис. 1). В юго-западном сегменте выраженные структуры разгрузки флюидов и придонных скоплений газовых гидратов не обнаружены, а сам разлом в рельефе дна практически не выражен.

Материалы и методы исследований. В ходе экспедиций проекта Class@Baikal разлом Гидратный был пересечен вкрест простирания многочисленными параллельными геофизическими профилями с шагом 1,5–4 км. Работы выполнялись по методике непрерывного сейсмоакустического профилирования. Использован набортный акустический профилограф (в 2015 и 2019 г.) с ЛЧМ-сигналом от 1 до 10 кГц, а также сейсмический комплекс для проведения малоглубинных исследований с электроискровым источником типа «спаркер» (в 2017 и 2018 г.) с центральной частотой излучаемого сигнала 300 Гц. Методика двухчастотных исследований используется для получения детальной информации о строении как приповерхностных отложений, так и более глубоких интервалов разреза. Данные, полученные при сейсморазведке со «спаркером», позволили изучить осадочный разрез до глубины 200–300 м ниже поверхности дна и закартировать тектонические нарушения. Акустические разрезы, полученные с использованием профилографа, показали детальное строение верхних 10–15 м отложений и особенности морфологии дна.

Вдоль 8 профилей, секущих основные зоны фокусированной флюидоразгрузки (структура МГУ и грязевые вулканы Новосибирск и Ухан) и разлом Гидратный в пределах различных его сегментов, были намечены станции донного газогеохимического опробования. Донный пробоотбор проводили с использованием 3- и 5-метровых гравитационных трубок с пластиковым вкладышем. После извлечения керна из трубки отбирали пробы осадка по вертикальному разрезу с интервалом 30 см. Осадок дегазировался согласно стандартной методике «Head-space» [Большаков, Егоров, 1987]. Получено и проанализировано 460 проб газов из

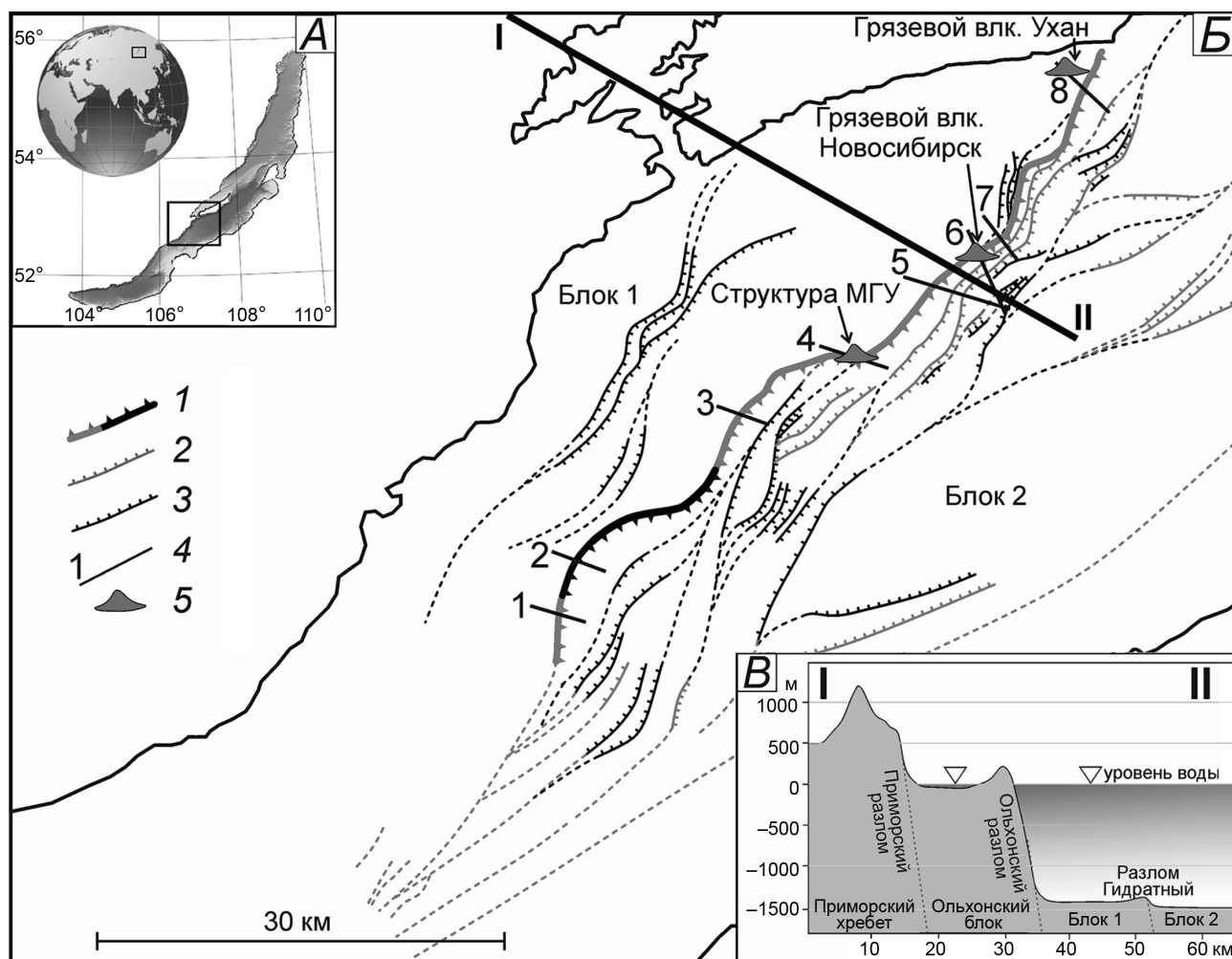


Рис. 1. Район исследований, расположенный вдоль разлома Гидратный. А — озеро Байкал с расположением района исследований (окопировано); Б — Карта разломов глубоководной части средней котловины Байкала с расположением профилей (черные линии), представленных на рис. 2, 3, 4 и 5; линия I–II показывает расположение профиля рельефа дна, представленного на схеме В по [Solovyeva et al., 2020], с изменениями.

I — разлом Гидратный; 2–3 — типы разломов по степени погребенности под молодыми осадками: 2 — тип 1 (0–10 м); 3 — тип 2 (>10 м); 4 — положение и номера профилей донного опробования; 5 — структуры с фокусированным выходом газа на поверхность

донных осадков на 80 станциях пробоотбора. Для каждого профиля, пересекающего разлом Гидратный, построены кривые распределения концентрации метана в осадках для глубины 100 и 200 см от поверхности дна и кривые максимальных значений концентрации метана в опробованном разрезе. Максимальные значения концентрации метана для каждой станции не превышали средние значения на станции больше чем в 2 раза, но для выделения аномальных зон кривые максимальных значений оказались наиболее показательны. Ниже приводятся и рассматриваются максимальные значения содержания метана на станциях вдоль изученных профилей. Для обобщенной характеристики газонасыщенности приповерхностных отложений поднятого и опущенного блоков использовано усреднение максимальных значений в пробах на всех станциях, отобранных на соответствующих участках профилей опробования.

Исследования молекулярного состава газовой фазы из осадков выполняли на борту судна на портативном газовом хроматографе «Хроматэк-

газохром 2000» с двумя детекторами по теплопроводности (детектор с повышенной чувствительностью на углеводородные газы и детектор на неуглеводородные газы). Использовали колонки М 0,5м Carboxen 1000/Heysesep R+M 2м *1mm CaA+ М 6м* 2ММ 20% Гептадекан на диатомитовом носителе 0,25–0,5. Температурный режим колонок — изотермический 50 °С. На полученных хроматограммах выполнена идентификация пиков углеводородов (УВ) от C₁ до C₆, в том числе насыщенных и ненасыщенных (непредельных). Расчет концентрации газовых компонентов в пробах выполняли относительно концентрации в метрологически аттестованной газовой смеси (производство «Мониторинг», г. Санкт-Петербург, аттестация выполнена во ВГУП ВНИИМ имени Менделеева).

Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) компонентов проб газа измеряли на масс-спектрометре изотопных отношений «Delta V Advantage» («Finnigan», Бремен, Германия) с пробоподготовкой на линии GC Isolink, включающей газовый хро-

матограф «Trace GC Ultra» и приставку «Isolink» с окислительным реактором.

Результаты исследований и их обсуждение.

Опробованный трубками разрез верхней толщи донных осадков представлен в основном типичными для Байкала слоями диатомового ила, окисленного в верхней части, и пелитовых илов с алевроитовой примесью. Пелитовые илы часто обогащены гидротроилитом. На участках распространения подводного грязевого вулканизма трубки вскрыли интервалы комковатой глины, состоящие из фрагментов-окатышей более консолидированной глины в разуплотненном алевроглинистом матриксе. В некоторых колонках отсутствовал верхний окисленный слой, а также прослой гидротроилита.

УВ газы в донных осадках представлены преимущественно метаном. Фоновые значения концентрации метана, определенные в осадках, отобранных вне зон фокусированной разгрузки газа, составляют 10 мл метана на литр осадка (далее мл/л).

Профиль 1 расположен в самой южной части района исследований (рис. 1). Разлом Гидратный в месте пересечения профилем перекрыт современными отложениями небольшой мощности (<20 м), несмотря на близость к дельте р. Селенга. Такая незначительная мощность перекрывающих отложений может быть связана с тем, что профиль 1 проходит между осадочных линз проксимальных накоплений конуса выноса р. Селенга. Осадки, отобранные вдоль профиля, представлены диатомовыми и алевро-глинистыми илами. На сейсмоакустическом профиле над разломом наблюдается небольшая положительная структура, характеризующаяся акустически прозрачной волновой картиной (рис. 2, А), что косвенно может свидетельствовать о газонасыщенности отложений. Концентрация метана в осадках вдоль профиля изменяется незначительно — от 75 до 128 мл/л, и лишь в самой юго-восточной точке профиля снижается до 11 мл/л. В центральной части профиля концентрация метана немного снижается. Небольшая разница объясняется тем, что осадки, отобранные в центральной части профиля, характеризовались повышенным содержанием алевроитовой примеси. Естественная дегазация более алевроитового осадка при подъеме трубки и вскрытии ее на борту судна происходит быстрее. До момента отбора проб в судовой лаборатории из алевроитистого ила часть газов уже успела высвободиться, за счет чего получились более низкие значения концентрации метана, чем в пробах из более глинистого ила.

Профиль 2 расположен на севере от профиля 1 на расстоянии 4 км (рис. 1). На сейсмоакустическом разрезе выделяются линзовидные комплексы, представленные отложениями развивающейся на этом участке осадочной системы конуса выноса

р. Селенга (рис. 2, Б). В этом месте разлом Гидратный погребен под ненарушенными отложениями и прослеживается лишь от глубины 90 м ниже уровня дна. Концентрация метана вдоль профиля изменяется незначительно — от 13 до 19 мл/л, превышая фоновые значения только в 1,4–2 раза. В целом невысокое содержание метана в донных отложениях над разломной зоной можно связать с большей мощностью (>90 м) современных осадков, перекрывающих разлом, и интенсивным рассеиванием фокусированного подтока в верхней части разреза. Тем не менее, в осадках, отобранных над разломом, отмечена следовая концентрация этана и пропана.

Профиль 3 расположен в 16 км на северо-восток от профиля 2 (рис. 1). На сейсмоакустическом разрезе наблюдаются две зоны вертикального смещения отражающих горизонтов — разрывные нарушения (рис. 2, В). Крупный разлом Гидратный достигает поверхности дна и образует в рельефе ступень высотой около 7 м. В пределах опущенного блока выделяется более мелкий разлом, перекрытый осадками мощностью около 20 м. Концентрация метана вдоль профиля изменяется от 29 до 96 мл/л. Средние значения концентрации метана на поднятом блоке составляют 36 мл/л. Опущенный блок характеризуется более высокой средней концентрацией метана — 82 мл/л. В пробах, отобранных на опущенном блоке, идентифицированы этан и пропан с концентрацией до 0,71 мл/л.

Профиль 4 пересекает разлом Гидратный в месте, где расположена гидратоносная структура МГУ. Структура МГУ — субизометричная в плане, многовершинная возвышенность с диаметром основания около 500 м [Ахманов и др., 2018]. На данных профилографа видно (рис. 3), что структура приурочена к подножию и склону тектонической ступени высотой около 20 м, образованной разломом Гидратный. Она характеризуется акустически прозрачной волновой картиной, которая образует субвертикальную зону, постепенно расширяющуюся вниз по разрезу. На северо-западе от основной структуры наблюдается диапирообразный объект, прорывающий осадочный разрез и перекрытый зоной с повышенной амплитудой отраженного сигнала на глубине около 8 м ниже уровня дна. В восточной части профиля на опущенном крыле выделяется небольшая положительная структура с акустически прозрачной волновой записью.

Осадки со станций, отобранные непосредственно над разломом, характеризовались наличием текстур дегазации и отсутствием окисленного слоя в верхней части. Значения концентрации метана повышены даже в станциях, отобранных на периферийных участках этого профиля (станции BL19-390G, BL19-396G), и составляют 16–19 мл/л.

Вдоль профиля выделяются три выраженные аномалии концентрации метана. Главная аномалия

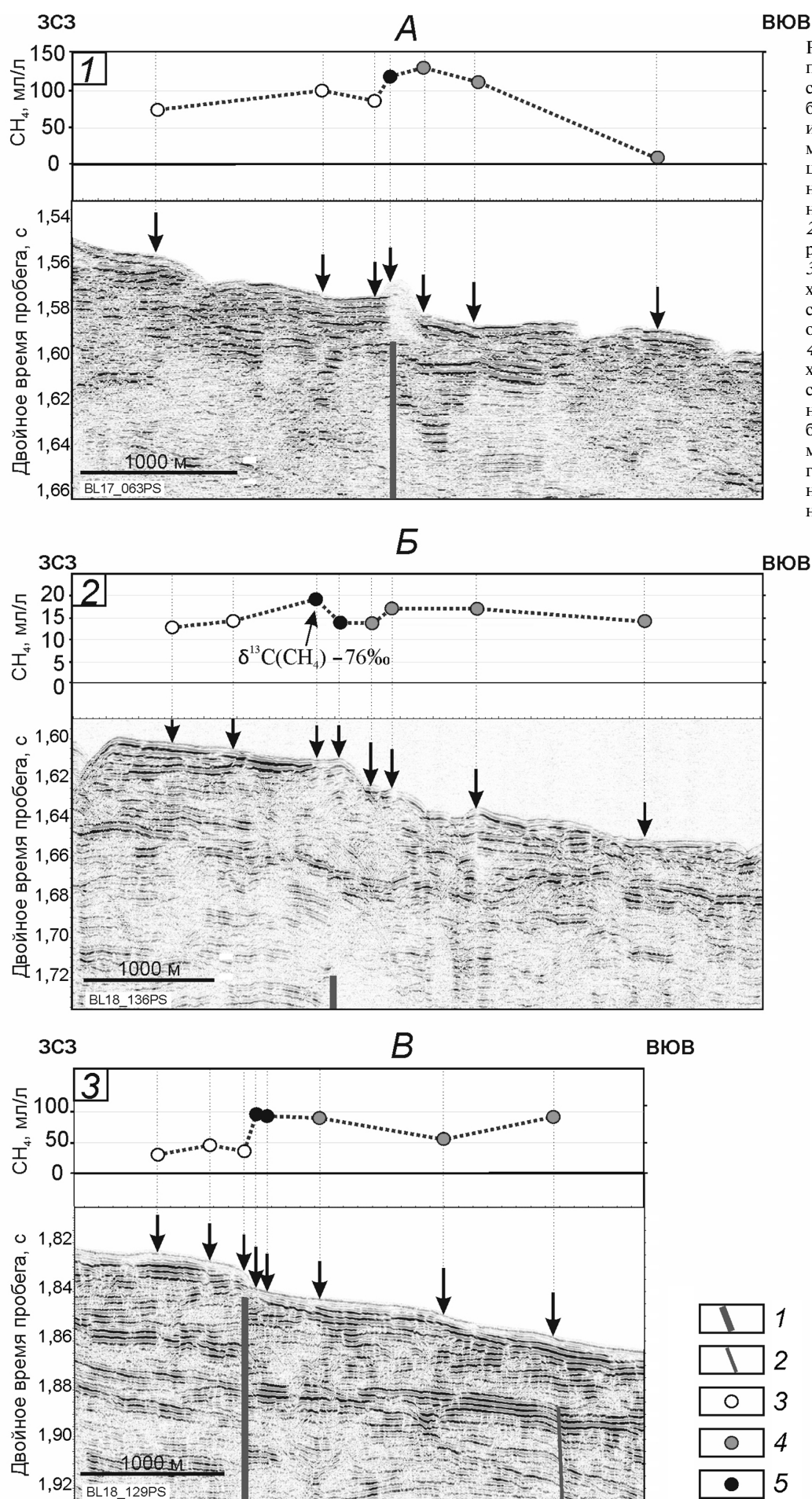
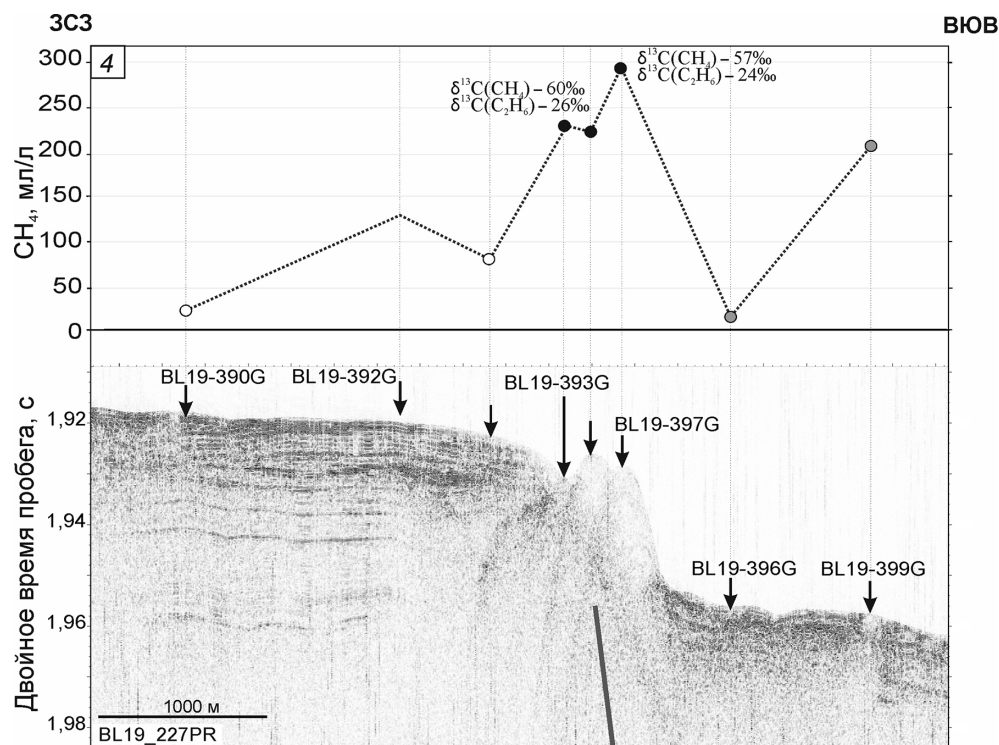


Рис. 2. Сейсмоакустические профили с положением станций донного пробоотбора (показаны стрелками) и профили (А–В) значений максимальной концентрации метана в опробованных отложениях: 1 — главный разлом Гидратный; 2 — сопутствующие второстепенные разломы; 3 — концентрация метана, характеризующая газонасыщенность осадков поднятого блока; 4 — концентрация метана, характеризующая газонасыщенность поверхностных осадков опущенного блока; 5 — концентрация метана, характеризующая газонасыщенность поверхностных осадков над главным сместителем разлома Гидратный

Рис. 3. Сейсмоакустический профиль 4 с положением станций донного пробоотбора (показаны стрелками) и профиль значений максимальной концентрации метана в опробованных отложениях. Условные обозначения см. на рис. 2



связана со структурой МГУ, здесь концентрация метана в осадках достигает 296 мл/л (станция BL19-397G). Вторая аномалия сопряжена с небольшой положительной структурой на опущенном блоке в восточной части профиля (станция BL19-399G), в которой определена концентрация метана, равная 212 мл/л. Третья аномалия, хотя и не со столь высокими значениями концентрации метана в осадках (до 126 мл/л; станция BL19-392G), отмечена на северо-западном борту структуры над диапироподобным объектом в осадочной толще. Помимо метана, среди УВ газов из осадков на станциях, где опробована вершина структуры МГУ, были обнаружены этан, пропан, изо-бутан, изо-пентан и пентан в концентрации свыше 2 мл/л.

Профиль 5 пересекает Гидратный разлом в 4,5 на юго-запад от структуры Новосибирск и расположен в 8 км на северо-восток от профиля 4. Высота уступа, образованного разломом, в этом районе достигает 50 м. На сейсмическом разрезе видно, что уступ осложнен оползневым блоком (рис. 4, А). Поднятое крыло характеризуется параллельнослоистой волновой картиной, отражающей ненарушенное залегание осадков. В опущенном крыле прослеживаются современно активные разрывные нарушения, выходящие на поверхность дна. Среднее значение концентрации метана на поднятом блоке составляет 86 мл/л, а на опущенном — 98 мл/л. Концентрация метана в осадках над зоной выхода разлома Гидратный на поверхность — 121 мл/л (станция BL19-458G). Над разломом, расположенным приблизительно в 1,5 км от Гидратного в пределах опущенного блока, выделяется еще одна современная зона

фокусированной разгрузки углеводородов — положительная структура в рельефе дна, характеризующаяся аномально высокой концентрацией метана в донных осадках — до 186 мл/л (станция BL19-461G), здесь же обнаружены этан и пропан. На сейсмоакустическом профиле в пределах этой структуры отмечена субвертикальная зона с хаотической волновой записью.

Профиль 6 проходил через структуру подводного грязевого вулкана Новосибирск [Cuylaerts et al., 2012]. Грязевой вулкан расположен на поднятом крыле разлома и хорошо выделяется в подводном рельефе дна и на сейсмоакустических профилях. Он представлен двухвершинной, положительной в рельефе дна структурой с акустически прозрачной волновой записью и субвертикальной зоной потери корреляции отражающих горизонтов (рис. 4, Б). На опущенном крыле у подножия грязевулканической структуры прослеживается серия субвертикальных разрывных нарушений, достигающих поверхности дна. Высота грязевого вулкана ~15 м, диаметр основания ~1200 м. Концентрация метана в осадках на поднятом блоке — до 98 мл/л, а в осадках опущенного блока — до 194 мл/л. Аномальная концентрация метана обнаружена на станциях, где опробована вершина грязевого вулкана, и достигает 216 мл/л. На этих же станциях в количестве до 3,62 мл/л присутствовали этан, пропан, изо-бутан и бутан. В отложениях у самого подножия уступа (станции BL14-030G и BL19-449G) определено несколько пониженное содержание метана (до 117 мл/л) и отсутствие гомологов. Вероятно, это объясняется развитием в этом месте оползневых накоплений, препятствующих свободной миграции газа к поверхности. На удалении от грязевого

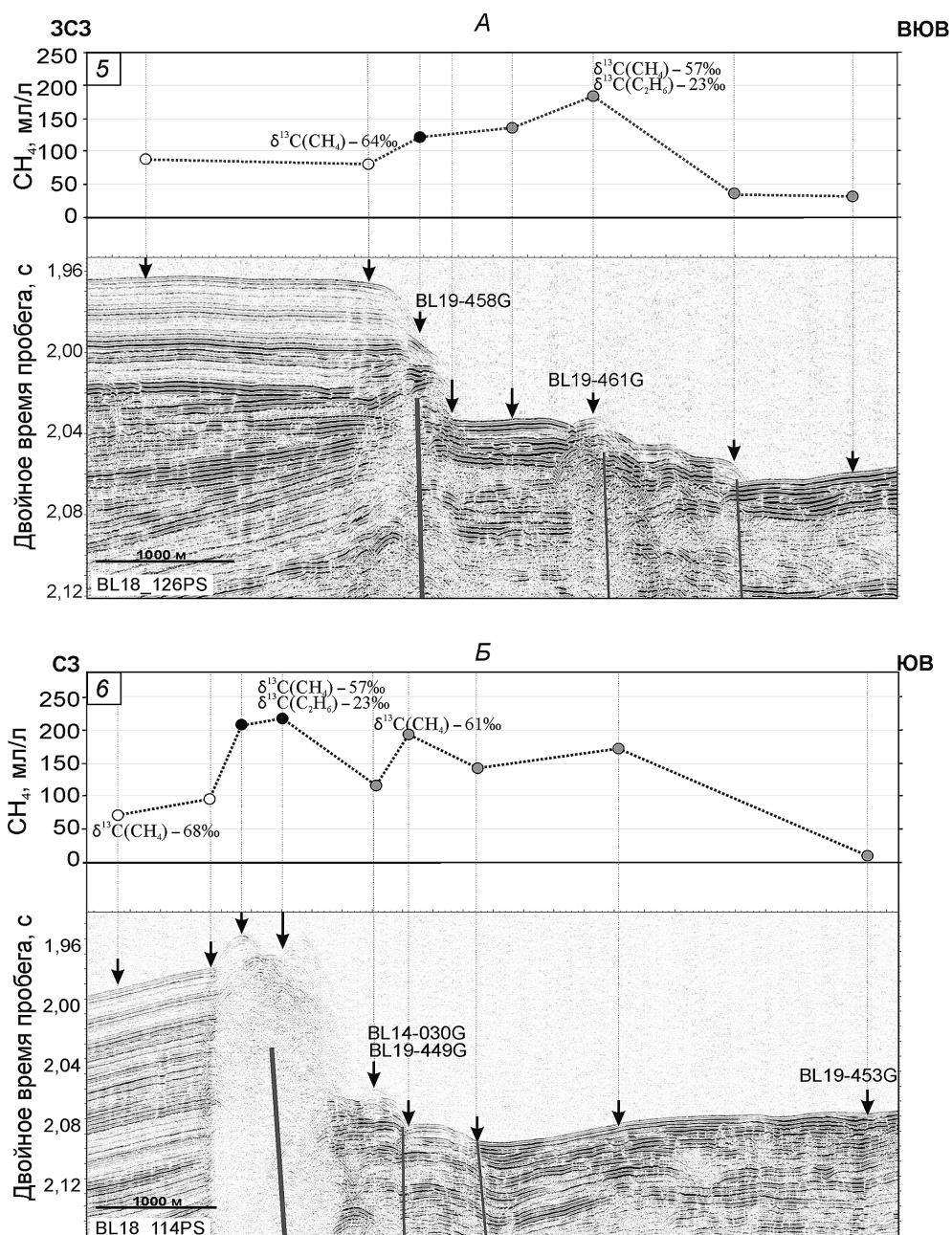


Рис. 4. Сейсмоакустические профили с положением станций донного пробоотбора (показаны стрелками) и профили значений максимальной концентрации метана в опробованных отложениях. Условные обозначения см. на рис. 2

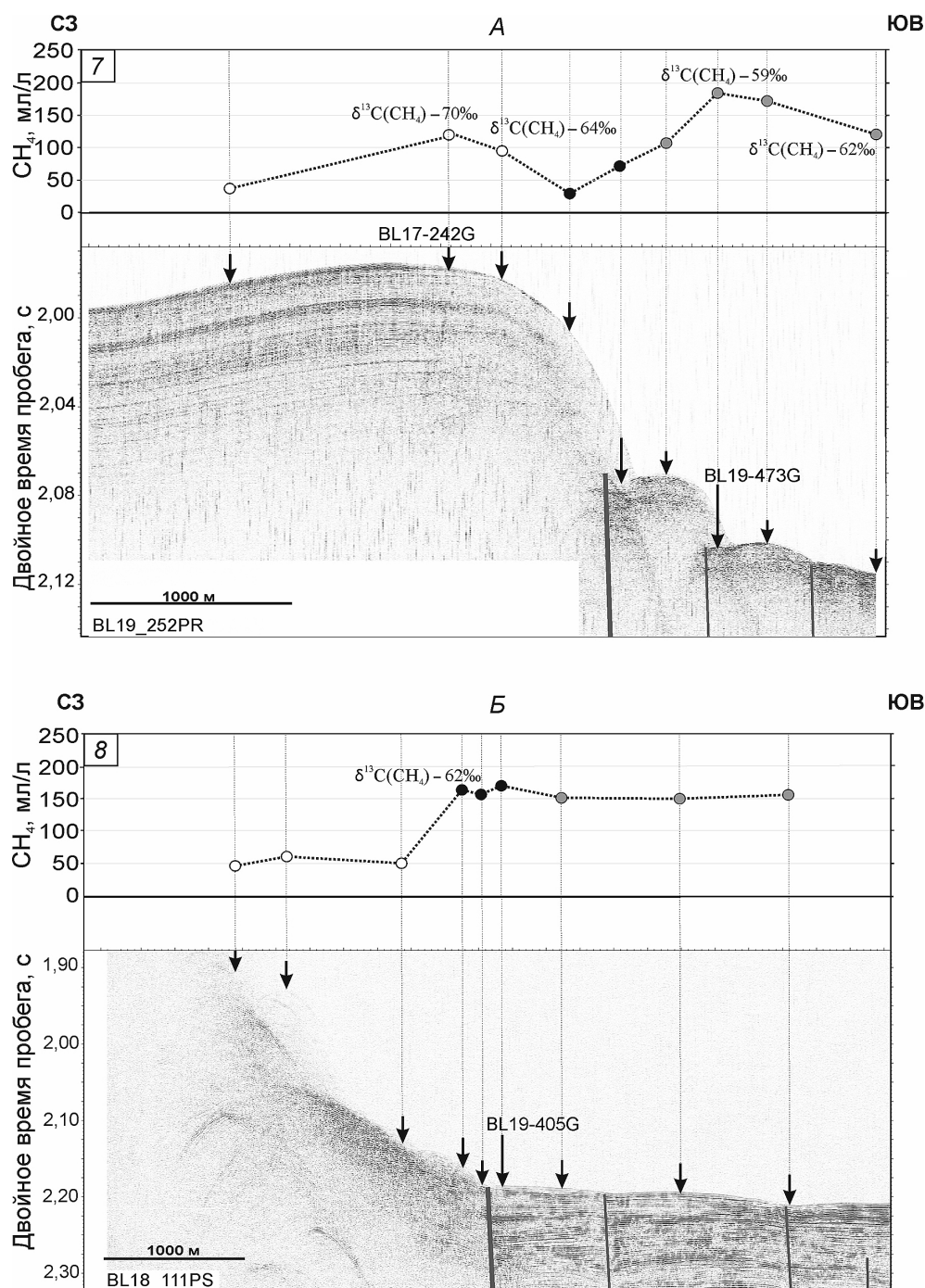
вулкана (станция BL19-453G) концентрация метана в поверхностных донных илах соответствует фоновой для района — не более 10 мл/л.

Профиль 7 расположен в 1,9 км на северо-восток от структуры Новосибирск. Высота уступа в зоне разлома достигает 90 м. На сейсмическом разрезе (рис. 5, А) на склоне уступа и у его подножия отмечено оползневое тело. Поднятое крыло характеризуется в целом ненарушенной, параллельнослоистой волновой картиной. Ближе к уступу слоистость становится заметно менее проявленной, многие рефлексоры теряются, увеличивается акустическая турбидность. Современные разрывные нарушения, выходящие на поверхность дна, выявлены в пределах опущенного блока. Средние значения концентрации метана на периферийных частях профиля на поднятом блоке составляют 84 мл/л, а на опущенном — 145 мл/л.

Аномальная концентрация метана определена на опущенном блоке на станции BL19-473G, она составила 182 мл/л. Помимо метана в станции BL19-473G обнаружены следы этана и пропана. Опробованная структура приурочена к одному из разломов. Осадки верхней бровки уступа также характеризуются повышенной концентрацией метана (до 120 мл/л на станции BL17-242G). В отложениях, отобранных на склоне уступа и у самого подножия, содержание метана невысокое, что, вероятно, объясняется развитием здесь современных оползневых процессов.

Профиль 8 выполнен в самой северо-восточной части изучаемого разлома Гидратный, вблизи о-ва Ольхон, он проходит через грязевой вулкан Ухан. Грязевой вулкан расположен на крутом подводном склоне западного борта центральной котловины, что осложняет изучение внутренней

Рис. 5. Сейсмоакустические профили с положением станций донного пробоотбора (показаны стрелками) и профили значений максимальной концентрации метана в опробованных отложениях. Условные обозначения см. на рис. 2



структуры вулкана геофизическими методами. На этом участке возможно наличие большого количества склоновых накоплений. Выложенная юго-восточная часть профиля характеризуется хорошо выраженной параллельнослоистой волновой картиной, осложненной множеством разрывных нарушений, большинство из которых достигает поверхности дна. Осадки в основном представлены типичными диатомовыми илами и пелитами. Местами встречаются прослои отложений турбидитовых потоков. Концентрация метана в северо-западной части профиля относительно низкая и редко превышает 50 мл/л, что, возможно, связано с тем, что склон и структура влк. Ухан активно засыпаются оползневыми накоплениями (рис. 5,

Б). Концентрация метана в юго-восточной части профиля, в пределах опущенного блока, существенно выше и изменяется от 150 до 155 мл/л, еще выше концентрация метана в донных отложениях над продолжением разлома Гидратный (станция BL19-405G), максимальное значение составило 171 мл/л. На этой же станции (помимо метана) в осадках обнаружены этан (0,7 мл/л) и пропан (0,01 мл/л).

В целом изучение молекулярного состава газов из осадков вдоль зоны разлома Гидратный показало, что УВ газы состоят в основном из метана (>99,5 об.% от всех УВ газов) с небольшими примесями гомологов метана C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} , C_5H_{12} , C_6H_{14} и из алканов изостроения $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$,

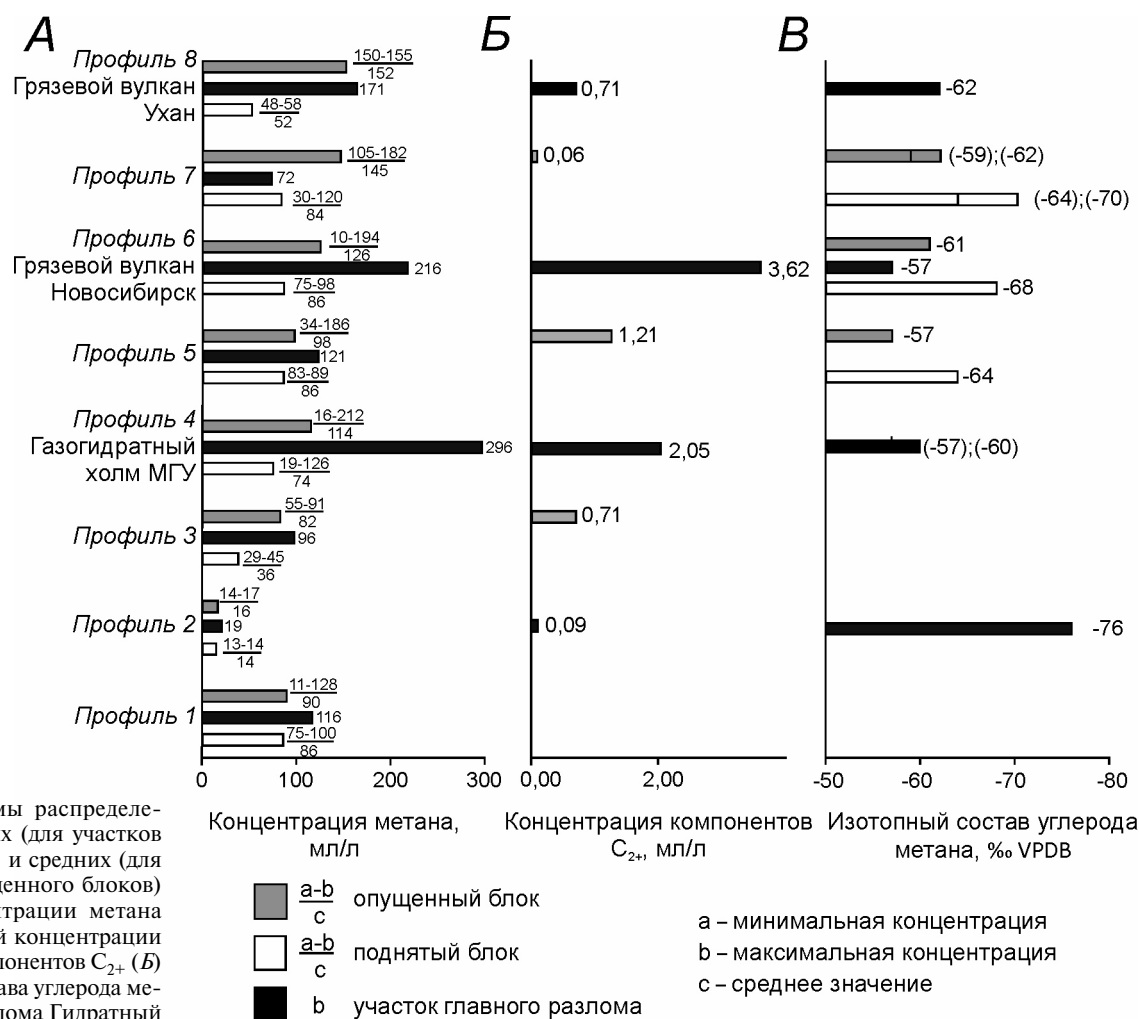


Рис. 6. Диаграммы распределения максимальных (для участков главного разлома) и средних (для поднятого и опущенного блоков) значений концентрации метана (А), максимальной концентрации газообразных компонентов C_{2+} (Б) и изотопного состава углерода метана (В) вдоль разлома Гидратный

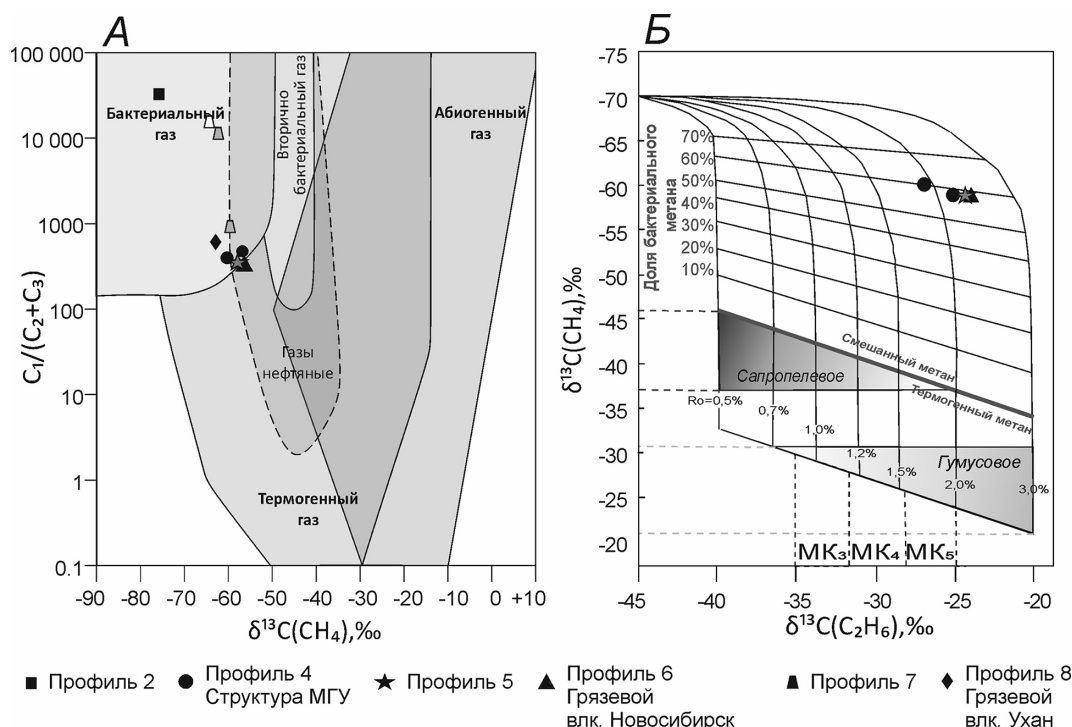
iC_5H_{12} (до 0,46 об.%). Концентрация метана в осадках колеблется от 10 до 296 мл/л осадка, содержание тяжелых УВ компонентов (C_{2+}) варьирует от 0 до 3,62 мл/л осадка. Почти на всех профилях наибольшие значения концентрации метана фиксируются непосредственно над разломами. По простиранию разлома максимальное содержание этого газа отмечено в северной части — в структурах МГУ (296 мл/л), грязевом вулкане Новосибирск (216 мл/л) и в районе грязевого вулкана Ухан (171 мл/л) (рис. 6, А). Наименьшая концентрация метана зафиксирована в станциях, отобранных на профиле 2, в юго-западной части района исследований. Участки с мощными накоплениями, перекрывающими разломную зону, характеризуются существенно пониженным содержанием метана и его гомологов в придонных отложениях по сравнению с районами, где разломы выходят на поверхность. Также отмечено, что вдоль профилей метана в осадках на опущенном блоке обычно в 1,5–3 раза больше, чем в осадках на поднятом блоке (рис. 6, А). Это хорошо соотносится с тем, что прилегающие к основному разлому Гидратный участки опущенного блока интенсивно разбиты множеством мелких, второстепенных разрывов, оперяющих главный сместитель разломной зоны, в то время как участки поднятого блока существ-

венно менее дислоцированы и, соответственно, менее проницаемы.

Повышенная концентрация газообразных компонентов C_{2+} характерна для всех известных структур с фокусированной флюидоразгрузкой (рис. 6, Б) и практически не отмечена за пределами их развития. Необычное распределение этих показателей выявлено лишь на профиле 3, где также зафиксирована повышенная концентрация компонентов C_{2+} . Возможно, это свидетельствует о том, что здесь в настоящее время происходит формирование новой структуры фокусированной разгрузки, такой, как грязевой вулкан или гидратный холм.

Данные изотопных исследований. Выявленная в ходе исследований закономерная приуроченность аномалий повышенной концентрации метана и его гомологов к отложениям, опробованным над тектоническими нарушениями и прежде всего над крупным разломом Гидратный, указывает на существенный вклад углеводородов из погруженных зон осадочного бассейна Байкала в формирование приповерхностной газогеохимической картины в средней котловине озера. Определить приблизительное соотношение между поступающими по разломам в зону разгрузки термогенными газами и относительно неглубоким микробиальным ме-

Рис. 7. Диаграммы молекулярных и изотопных характеристик углеводородных газов: *А* — генетическая диаграмма отношений $\delta^{13}\text{C}$ метана и $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ [Milkov, Etiope, 2018 с изменениями]; *Б* — генетическая диаграмма отношений изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ метана и этана (комбинированная диаграмма [Janiga et al., 2015; Whiticar, 1994])



таном позволяют данные изотопных исследований углерода [Галимов, 1968; Whiticar, 1994].

Изотопный состав углерода изученных проб метана из донных осадков в пределах зоны разлома Гидратный изменяется от -76 до -57‰ VPDB (рис. 2–5). Самый тяжелый изотопный состав углерода метана (-57‰ VPDB) отмечен в пробах, отобранных на участках современной фокусированной разгрузки газа в пределах структуры МГУ (рис. 3), грязевого вулкана Новосибирск (рис. 4, Б) и для структуры, обнаруженной и опробованной на профиле 5 (рис. 4, А), детально описанной выше. Здесь, вероятно, подток метана из глубоких горизонтов осадочного разреза наиболее существенный. Это же можно предположить и для профиля 7 (рис. 5, А), где изотопный состав углерода метана из осадков, отобранных над одним из разломов опущенного блока, также относительно утяжеленный (-59‰ VPDB).

Метан с периферийных частей активных зон флюидоразгрузки характеризуется в целом изотопным облегчением углерода (от -60 до -76‰ VPDB) по сравнению с метаном из донных накоплений на центральных участках соответствующих структур (рис. 2–5). Очевидно, концентрация термогенных газов здесь меньше, а доля микробного метана закономерно увеличивается по мере удаления от основных каналов миграции глубинных флюидов. Самый легкий изотопный состав углерода метана (-76‰ VPDB) в донных осадках выявлен в районе юго-западного сегмента разлома Гидратный (рис. 2, Б), погребенного под мощной толщей современных наносов стока р. Селенга.

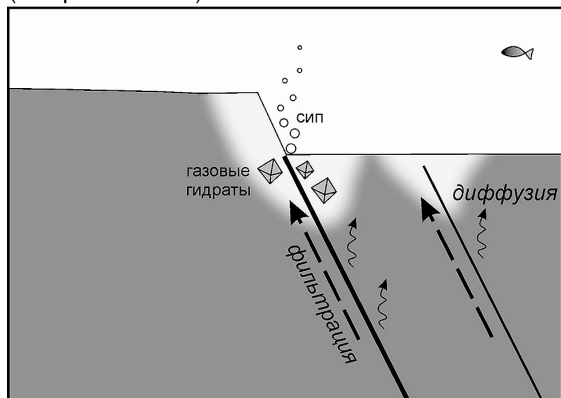
Выдвинутые предположения о природе изученных углеводородных газов можно расширить,

опираясь на апостериорные генетические диаграммы (рис. 7) [Milkov, Etiope, 2018; Whiticar, 1994; Janiga et al., 2015]. Для проб, где присутствуют гомологи метана, рассчитано отношение $\text{C}_1/(\text{C}_2 + \text{C}_3)$ и определен изотопный состав углерода этана там, где его концентрация позволяла провести измерения (пробы из центра и с периферии структуры МГУ, из грязевого вулкана Новосибирск и из структуры фокусированной разгрузки, пересеченной профилем 5 (рис. 3 и 4)). Полученные значения параметров указывают на то, что углеводородные газы, разгружающиеся на дне Байкала в пределах этих структур, имеют смешанное происхождение (рис. 7). В их составе наряду с термогенными компонентами присутствует значительная доля микробного метана. При наличии восходящего потока природного газа создаются благоприятные условия для развития микробных процессов, поэтому термогенный метан «маскируется» добавлением микробного газа, выработанного в верхних горизонтах разреза. Собственно термогенные компоненты, вероятно, мигрируют из горизонтов осадочного разреза, которые находятся на стадии преобразования, соответствующей зоне мезо-апокатагенеза, а исходное органическое вещество для газогенерации может быть отнесено к гумусовому типу.

Особенности миграции флюидов к поверхности.

Результаты молекулярного и изотопного изучения проб, отобранных из донных отложений, которые развиты в районе разлома Гидратный, свидетельствуют о том, что разлом пронизаем для вертикальной миграции термокаталитических углеводородных газов, и на участках, где он выходит на поверхность, контролирует формирование

Модель 1
(тип разломов 1)



Модель 2
(тип разломов 2)

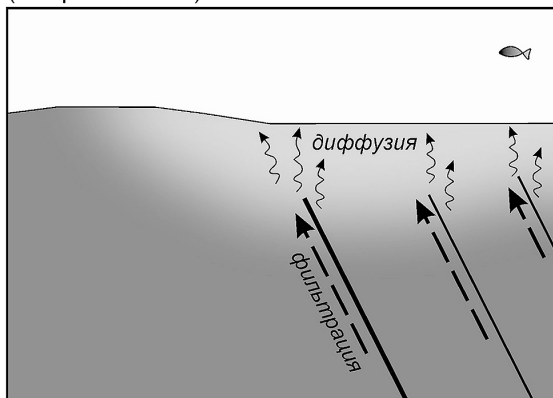


Рис. 8. Схемы, иллюстрирующие основные типовые случаи (модели) миграции газов в верхних частях разреза в пределах зоны разлома Гидратный (см. пояснения в тексте)

зон фокусированной разгрузки флюидов на дне озера. Данные наших исследований также позволяют оценить влияние особенностей современного осадконакопления на формирование газо-геохимических полей и показательность индикаторов, рассматриваемых обычно при анализе масштабов миграции газов к поверхности. Выявленные закономерности газонасыщенности донных илов в районе разлома Гидратный и изотопного состава углерода изученных проб газов можно объяснить на примере двух моделей (типовых случаев) вертикальной миграции (рис. 8).

Модель 1 иллюстрирует процесс миграции флюидов, когда проводящий разлом выходит на поверхность дна. В этом случае газ концентрированно мигрирует, формируя на дне озера структуры фокусированной разгрузки. Концентрация метана над разломом во много раз превышает фоновую. Это в свою очередь может приводить к образованию приповерхностных скоплений газовых гидратов, что характерно для центрального и северо-восточного сегментов разлома Гидратный. Молекулярное и изотопное фракционирование проявлено слабо. В миграции газов фильтрация по разлому существенно преобладает над диффузией, что отражается в том, что углерод метана остается изотопно утяжеленным, а количество компонентов C_{2+} в газовой смеси — значимым. Это особенно ярко проявлено непосредственно над главным сместителем разломной зоны. Но схожие процессы, вероятно, наблюдаются и в пределах разбитых второстепенными разломами примыкающих участков опущенного блока, где в отобранных колонках осадков также отмечается незначительное повышение концентрации метана по сравнению с менее дислоцированными участками поднятого блока.

Модель 2 объясняет особенности газонасыщенности придонных отложений в случае, когда главный канал миграции, разлом Гидратный, не достигает поверхности дна, а перекрыт относительно мощной толщей современных ненарушенных

осадков, что характерно для юго-западного сегмента разломной зоны вблизи аванделты р. Селенга. Здесь газ мигрирует по проводящему разлому за счет процессов фильтрации, а в перекрывающих разлом донных отложениях происходит только диффузия газа и, соответственно, его рассеяние. Концентрация газа над основным сместителем разлома будет превышать фоновую, но незначительно, а процессы молекулярного и изотопного фракционирования в ходе диффузии будут ответственны за ничтожную концентрацию регистрируемых компонентов C_{2+} (или полное их отсутствие) в осадках и изотопное облегчение состава углерода метана. Доля первично микробного метана, выработанного в верхних частях разреза, будет существенной или даже преобладающей в газах придонных отложений.

Таким образом, особенности неотектонической активности и современной седиментации определяют поверхностные характеристики флюидоразгрузки в пределах всего района разлома Гидратный, как вдоль его простирания, так и в поперечном сечении его основных сегментов. Фильтрационный механизм миграции флюидов из глубины осадочного разреза к поверхности, обеспеченный хорошей проводимостью разломов, проявлен в повышенной концентрации метана с изотопно тяжелым углеродом и наличии гомологов метана в поверхностных осадках там, где дизъюнктивные нарушения выходят на поверхность озера. В пределах участков, перекрытых толщей современных осадков, или тектонически слабонарушенных сегментов в большей степени проявлена диффузионная природа миграции флюидов. Здесь углеводородные газы в поверхностных отложениях имеют «биогеохимический облик» геохимических характеристик, а на подток флюидов из глубины косвенно указывает лишь их повышенная концентрация.

Выводы. 1. Большинство разломов зоны хорошо проницаемы, и по ним происходит миграция флюидов из глубины осадочного разреза озера; молекулярные и изотопные исследования под-

твердили наличие углеводородных газов термокаталитического происхождения.

2. Поверхностные геохимические характеристики флюидоразгрузки в значительной степени определяются степенью выраженности тектонических дислокаций и мощностью современных накоплений, перекрывающих разломы; доминирование одного из способов миграции газа (фильтрация или диффузия) в верхних частях разреза отражается в наблюдаемых значениях концентрации метана и его гомологов в приповерхностных отложениях, а также в регистрируемом изотопном составе углевода метана.

3. Высокая концентрация газов и утяжеленный изотопный состав углерода метана характерны для отложений, распространенных непосредственно над основным сместителем разломной зоны; при удалении от разлома концентрация газов в осадках уменьшается, а изотопный состав углерода метана делается легче; концентрация метана в осадках обычно выше на опущенном блоке, где в верхних частях разреза отмечены многочисленные разрывные нарушения; концентрация метана в осадках на поднятом, менее дислоцированном блоке обычно ниже.

4. Содержание метана в осадках наибольшее в пределах центрального и северо-восточного сегментов разломной зоны; зарегистрированные максимумы концентрации метана и его гомологов, а также приповерхностные скопления природных газовых гидратов приурочены к выраженным зонам фокусированной флюидоразгрузки — гид-

ратоносной структуре МГУ, грязевым вулканам Новосибирск и Ухан; значительно меньше газов присутствует в приповерхностных отложениях юго-западного сегмента разломной зоны, расположенного в пределах участка мощных терригенных накоплений, связанных с выносом р. Селенга.

Благодарности. Проект Class@Baikal и его научно-образовательные экспедиции под девизом «Обучение через исследования» немыслимы без помощи и поддержки сотрудников и студентов кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых и кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также декана факультета, акад. РАН Д.Ю. Пушаровского и директора ЛИН СО РАН А.П. Федотова. Авторы благодарны капитану Р.А. Битюцкому и всей команде НИС «Г.Ю. Верещагин» за их высокий профессионализм и радушную атмосферу во всех экспедициях на Байкале. Авторы глубоко признательны В.Н. Ефремову за инженерно-техническое обеспечение сейсморазведочных работ, А.Ю. Юрченко и Е.А. Красновой — за помощь в изотопных исследованиях.

Финансирование. Организация и проведение экспедиционных работ проекта Class@Baikal финансировались за счет средств геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, международного проекта Норвежского исследовательского совета HOTMUD (проект № 288299), государственного задания ЛИН СО РАН № 0345-2019-0007 (гос. рег. № AAAA-A16-116122110064-7), ООО «ЦМИ МГУ» и канд. геол.-минер. н. Е.А. Бакай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А. и др. Флюидоразгрузка на дне Байкала: результаты экспедиции Class@Baikal-2019 // Тр. VIII Междунар. научн.-практ. конф. «Морские исследования и образование (MARESED-2019)». Т. 2. Тверь: ООО «ПолиПресс», 2019. С. 36–40.
- Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А. и др. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз. Байкал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018. № 5. С. 111–116.
- Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газметрических исследованиях в акваториях // Океанология. 1987. Т. 37, № 5. С. 861–862.
- Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углевода. М.: Недра, 1968. 226 с.
- Гранин Н.Г., Гранина Л.З. Газовые гидраты и выходы газов на Байкале // Геология и геофизика. 2002. Т. 43 (7). С. 629–637.
- Горшков А.Г., Хлыстов О.М., Земская Т.И., Москвин В.И. Фракционирование нефти на глубоководных участках нефтепроявлений озера Байкал // Успехи органической геохимии: Мат.-лы Всеросс. науч. конф. (11–15 октября 2010 г.). М., 2010. С. 116–119.
- Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М. Генетические типы метана озера Байкал // Докл. РАН. 2006. Т. 411, № 5. С. 672–675.
- Калмычков Г.В., Покровский Б.Г., Хачикубо А., Хлыстов О.М. Геохимические характеристики метана из осадков подводной возвышенности Посольская банка (озеро Байкал) // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 2. С. 121–129.
- Каширцев В.А., Конторович А.Э., Москвин В.И. и др. Терпаны нефтепроявлений озера Байкал // Нефтехимия. 2006. Т. 46, № 4. С. 243–250.
- Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 12. С. 1346–1536.
- Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 5. С. 391–406.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.
- 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.
- Самсонов В.В. Генетическая классификация газопроявлений юго-восточного побережья Байкала // Геология и геофизика. 1963. № 7. С. 32.
- Хлыстов О.М. Гидратоносность и тектоника средней котловины озера Байкал // Тр. VII Междунар. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование

(MARESEDU-2018)». Т. 2. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2018. С. 41–42.

Хлыстов О.М., Горшков А.Г., Егоров А.В. и др. Нефть в озере мирового наследия // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 5. С. 1–4.

Хлыстов О.М., Земская Т.И., Ситникова Т.Я. и др. Донные битумные постройки и населяющая их биота по данным обследования озера Байкал с глубоководных обитаемых аппаратов «МИР» // Докл. РАН. 2009. Т. 428, № 5. С. 1–4.

Cuylaerts M., Naudts L., Casier R. et al. Distribution and morphology of mud volcanoes and other fluid flow-related lake-bed structures in Lake Baikal, Russia // Geo-Marine Lett. 2012. Vol. 32, N 5. P. 383–394.

Janiga M., Kania M., Matyasik I. The isotopic composition of gaseous hydrocarbons — tool for polish shale gas system evaluation // Nafta-Gaz. 2015. Vol. 6. P. 370–375.

Hachikubo A., Khlystov O., Krylov A. et al. Molecular and isotopic characteristics of gas-hydrate bound hydrocarbons in southern and central Lake Baikal // Geo-Marine Lett. 2010. Vol. 30, N 3-4. P. 321–329.

Hutchinson D.R., Gol'mshtok A.Yu., Zonenshain L.P. et al. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic // Geology. 1992. Vol. 20. P. 589–592.

Khlystov O.M., Khabuev A.V., Minami H. et al. Gas hydrates in Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2018. Vol. 1. P. 66–70.

Levi K., Babushkin S., Badardinov A. et al. Active Baikal tectonics // Russ. Geol. and Geophys. (Geologiya i Geofizika). 1995. Vol. 36. P. 143–154.

Milkov A., Etiope G. Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20,000 samples // Organic Geochem. 2018. T. 125. P. 109–120.

Solovyeva M.A., Akhmanov G.G., Mazzini A. et al. The Gydratny Fault zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2020. Vol. 1. P. 368–373.

Whiticar M.J. Correlation of natural gases with their sources // The petroleum system — from source to trap // AAPG Mem. 1994. Vol. 60. P. 261–284.

Поступила в редакцию 02.12.2020

Поступила с доработки 28.12.2020

Принята к публикации 28.12.2020