

## Различия в молекулярном и изотопном составе газов зон фокусированной разгрузки, расположенных в северо-западной и юго-восточной частях озера Байкал

О.Н. Видищева<sup>1\*</sup>, Г.Г. Ахманов<sup>1,2</sup>, Е.В. Кислицына<sup>3</sup>, А. Маццини<sup>4</sup>, А.Ю. Мальцева<sup>5</sup>,  
Е.Н. Полудеткина<sup>1</sup>, Е.А. Бакай<sup>1</sup>, И.Э. Манько<sup>1</sup>, Д.В. Корост<sup>1</sup>, О.М. Хлыстов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

<sup>3</sup>ООО «Бейсип-ГеоТехнологии», Москва, Россия

<sup>4</sup>Университет Осло, Осло, Норвегия

<sup>5</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

<sup>6</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

В работе рассмотрены результаты газогеохимических исследований донных осадков озера Байкал, и проанализированы перспективы нефтегазоносности Байкальской рифтовой впадины. В основу работы положен материал, собранный в 2014–2019 гг. во время научно-исследовательских экспедиций по Международному проекту Class@Baikal. Молекулярные и изотопные исследования флюидов из донных отложений озера выявили различия в составе газов донных осадков северо-западной и юго-восточной частей озера. Газы донных отложений северо-западной части озера обогащены метаном и характеризуются пониженным содержанием соединений  $C_{2+}$ . Углерод метана обогащен легким изотопом ( $\delta^{13}C$   $CH_4$  изменяется от -72,7 до -50,1 ‰ VPDB), а изотопный состав углерода этана варьирует в широких пределах ( $\delta^{13}C$   $C_2H_6$  от -65 ‰ до -22 ‰ VPDB). Газы донных отложений юго-восточной части озера характеризуются повышенным содержанием соединений  $C_{2+}$  и обогащены тяжелым изотопом углерода метана ( $\delta^{13}C$   $CH_4$  варьирует от -57,2 до -41,0 ‰ VPDB). Изотопный состав углерода этана изменяется от -32 до -25 ‰ VPDB. Такие отличия в составе газов, скорее всего, отражают асимметричное строение Байкальской рифтовой впадины и обусловлены особенностями миграции газа в пределах её разных частей. Предполагается более существенный вклад диффузионного механизма в массоперенос в северо-западной части озера, что приводит к обогащению легким изотопом углерода газов и повышению концентрации метана в смеси углеводородных компонентов (молекулярное и изотопное фракционирование) на путях миграции через осадочную толщу от источника генерации к поверхности дна озера. Такое геохимическое фракционирование необходимо учитывать при анализе и интерпретации данных геохимических съемок, направленных на оценку потенциала и характеристик нефтегазоматеринских пород осадочных бассейнов.

**Ключевые слова:** озеро Байкал, континентальный рифтогенез, газовая геохимия, нефтяные системы, метановые сипы, газовые гидраты

**Для цитирования:** Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Кислицына Е.В., Маццини А., Мальцева А.Ю., Полудеткина Е.Н., Бакай Е.А., Манько И.Э., Корост Д.В., Хлыстов О.М. (2022). Различия в молекулярном и изотопном составе газов зон фокусированной разгрузки, расположенных в северо-западной и юго-восточной частях озера Байкал. *Георесурсы*, 24(2), с. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.19>

### Введение

Озеро Байкал занимает центральную часть Байкальской рифтовой зоны, самой крупной в России и второй по величине на суше в мире (Хаин, 2005). Озеро Байкал – самое большое и самое глубокое озеро на Земле (Галазий, 1993), его осадочное выполнение формируется более 25 млн лет (Hutchinson et al., 1992; Mats et al., 2000).

Согласно осадочно-миграционной теории происхождения нефти Н.Б. Вассоевича (Вассоевич, 1967), источником нефти является органическое вещество или кероген, захороненный в процессе осадконакопления, а залежи нефти формируются в процессе миграции

рассеянных битумоидов (микронепти). В осадочном бассейне Байкальского рифта идет генерация углеводородных флюидов (Конторович и др., 2007) и их миграция к поверхности в настоящее время. Это делает озеро интереснейшим объектом для изучения процессов образования и миграции нефти и газа, которые формируют геохимические поля в донных осадках. Инструмент изучения геохимических полей – газогеохимическая съемка поверхностных отложений. Научной основой геохимических поисковых методов является учение о миграции, рассеянии и концентрации химических элементов в земной коре, заложенное трудами В.И. Вернадского, В.М. Гольдшмидта и А.Е. Ферсмана. Статистическая оценка применения геохимических методов для поисков месторождений нефти и газа доказывает их эффективность.

Основными объектами исследования при использовании геохимических методов являются поверхностные донные осадки и придонная вода. Газовый метод основан

\* Ответственный автор: Олеся Николаевна Видищева  
e-mail: [vid6877@yandex.ru](mailto:vid6877@yandex.ru)

© 2022 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

на изучении концентрации и состава газов, извлеченных из донных отложений.

Угледородные газы (УВ), находящиеся в донных осадках и придонно-пограничном слое водной толщи, поступают из различных источников. Миграционная составляющая газовой смеси представлена компонентами из глубинных источников, в том числе месторождений нефти и газа. По данным большинства исследователей (Старобинец и др., 1993; Етиоре, 2015), миграция происходит двумя способами – посредством диффузии и фильтрации. Помимо диффузионно-фильтрационного массопереноса углеводородов из их скоплений под влиянием перепада давлений или концентраций большую роль в миграции углеводородов при формировании и рассеянии залежей нефти и газа играют неотектонические движения и даже напряженное состояние локальных зон земной коры (Старобинец и др., 1993). Среди углеводородных газов метан обладает наиболее высокой миграционной способностью, которая обусловлена повышенным коэффициентом диффузии, низкой (по сравнению с другими углеводородами) сорбционной способностью по отношению к породам, сравнительно небольшой его растворимостью в воде. Важно, что в сравнении с гомологами метан диффундирует более интенсивно (Старобинец и др., 1993).

Кроме того, метан образуется непосредственно в донных осадках и морской воде в результате жизнедеятельности микроорганизмов (Исидоров, 1985). В целом, метан обычно количественно преобладает в газовой фазе донных осадков, составляя около 90 % от суммы углеводородных газов (Габриэлянц, 2003).

Данная работа посвящена анализу и интерпретации данных газеохимических исследований донных отложений озера Байкал с целью выяснить происхождение УВ газов и объяснить природу различий в их молекулярном и изотопном составе.

### Геологическое строение

Район исследования приурочен к Байкальскому рифту. Его расположение, морфология и история развития определяются, в первую очередь, связью с полосой сочленения двух крупных контрастных структур земной коры – Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса (Логачев, 2003).

Байкальская впадина расположена вдоль юго-восточного края Сибирской платформы и составляет приблизительно треть полной длины рифтовой зоны.

Впадина Байкальского рифта характеризуется асимметричным строением (рис. 1). Её северо-западный борт отличается значительной крутизной и развитием крупных долгоживущих разломов. Юго-восточный борт впадины более пологий и, вероятно, осложнен многочисленными малоамплитудными разновозрастными сбросами (Hutchinson et al., 1992; Логачев, 2003).

Фундамент Байкальского рифта сложен архей-протерозойскими метаморфизованными породами. Осадочное выполнение формировалось в кайнозойскую эру и представлено, главным образом, полимиктовыми, бескарбонатными глинисто-песчано-алевритовыми отложениями прибрежно-озерных, дельтовых и собственно озерных фаций с многочисленными угольными пластами позднеолигоценного-раннеплиоценового возраста (Мац, 2015).

Максимальная мощность (7,5 км) осадочных накоплений рифта определяется в Центральной и Южной котловинах озера (Hutchinson et al., 1992).

Геологические особенности Байкальской впадины создают благоприятные предпосылки для нефтегазообразования: слоистое строение осадочного комплекса, чередование потенциальных коллекторов и флюидоупоров. Глинистые отложения и углисто-глинистые толщи выполнения рифта могут рассматриваться в качестве потенциальных нефтегазоматеринских пород (Конторович и др., 2007). Аномальный тепловой поток, который привел к значительному прогреву района, должен способствовать генерации УВ флюидов (Конторович и др., 2007). Так, средний геотермический градиент Южного и Среднего Байкала варьирует в пределах  $7 \pm 2$  °C и  $6 \pm 2$  °C на 100 м, соответственно (Гольмшток, 1997).

Известно множество выходов УВ газов на дне озера Байкал. На данный момент известно 54 структуры выхода газа на дне озера, с которыми ассоциированы скопления газовых гидратов (Khlystov et al., 2018). УВ газы представлены преимущественно метаном с небольшим количеством его гомологов. При этом метан имеет как биогенное, так и термогенное происхождение (Калмычков и др., 2006, 2017, 2019). Кроме того, на озере Байкал известны несколько нефтепроявлений в виде пленок на поверхности воды: в 7 км к северо-западу от мыса Горевой Утес; в прибрежной части акватории озера – севернее залива Провал, напротив устьев р. Стволовая, Большая и Малая Зеленовские (Конторович и др., 2007). В начале XX столетия были описаны находки углеводородов в твердом виде, представленных озокеритами, на побережье Байкала, вблизи станции Танхой, поселка Ключи-Стволовая, а также бухты Песчаной. Найденные кериты имеют явное генетическое родство с байкальской нефтью (Исаев, 2013). В 2007 году были обнаружены на дне озера, на глубине свыше 700 м на траверсе мыса Горевой Утёс, и впервые детально исследованы придонные битумные постройки. Характерной чертой «свежих» построек являлось наличие на их вершине «капельницы», через которую периодически высачивались отдельные капли нефти (Хлыстов и др., 2009). Предполагается, что основным исходным органическим веществом для Байкальских нефтегазоматеринских пород (НГМП) являются остатки

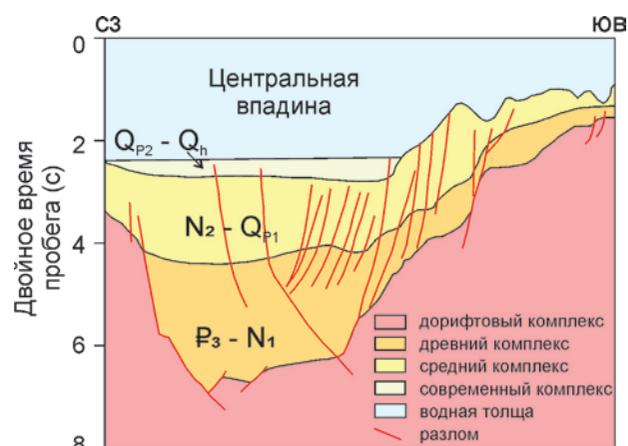


Рис. 1. Схематический профиль, основанный на интерпретации данных непрерывного сейсмического профилирования (Hutchinson et al., 1992, с изменениями)

высшей растительности и озерного планктона. Так как в байкальских нефтях был обнаружен олеанан, считается, что возраст нефтематеринских отложений Байкальского рифта меловой или моложе (Конторович и др., 2007).

### Материалы и методы

Во время экспедиций Международного научно-образовательного проекта Class@Baikal, в 2014–2019 гг., на борту НИС «Г.Ю. Верещагин» на акватории озера Байкал проводились газогеохимические исследования донных отложений (отбор осадков, дегазация, хроматографический и изотопный анализ газа, выделение полей аномальных концентраций метана). Пробоотбор грунтов осуществлялся с использованием 3-х и 5-ти метровой гравитационной трубки с внутренним пластиковым вкладышем. Пробы осадка для извлечения газа отбирались вдоль всего полученного керна с интервалом около 30 см. Дегазация проб осадка проводилась согласно стандартной методике «Head-space» (Большаков, Егоров, 1968).

Молекулярные исследования УВ газов были выполнены на приборе Trace GC Ultra Thermo Finnigan, колонка Sol Varian, длина – 50 м, диаметр – 0,53 мм, сорбционный слой – 0,25 мкм. Материал напыления –  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Температура испарителя – 225 °С, детектора – 250 °С, температурный режим колонки – ступенчатый, от 40 °С до 120 °С. Идентификация и интеграция пиков проводилась в программе Chrom-Card for Trace.

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

хроматограф Trace GC Ultra и приставку Isolink с окислительным реактором. Воспроизводимость результатов анализа не выходит в среднем за пределы  $\pm 0,2\%$ .

В основу работы легли материалы, собранные в ходе экспедиций проекта Class@Baikal. Всего было отобрано и изучено более 4000 образцов УВ газов из донных осадков озера Байкал в пределах 16 крупных структур центральной и южной котловин озера (рис. 2). Анализ изотопного состава углерода метана был выполнен для 140 образцов. В 50 образцах концентрация этана также была достаточной для выполнения изотопных исследований.

### Результаты исследований

Как показали результаты наших исследований, донные накопления озера Байкал в целом довольно газонасыщены. Преобладающим компонентом газовой смеси является метан (99–100 %). Наибольшие концентрации  $\text{CH}_4$  характерны для зон фокусированной углеводородной разгрузки – газовых сипов, грязевых вулканов (Видищева и др., 2021; Khlystov et al., 2019; Ахманов и др., 2018). Обычно содержание метана возрастает с увеличением глубины отбора пробы газа из поднятого керна. В подчиненном количестве в образцах обнаруживаются предельные УВ газы – этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) и изобутан ( $i\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), неопентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ), и непредельные – этилен ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), пропилен ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), бутилен ( $\text{C}_4\text{H}_8$ ).

Для определения фоновых значений газонасыщения донных илов Байкала были проанализированы газы образцов из районов, где фокусированная разгрузка флюидов не регистрируется: полигон Еловский и полигон Хурай. Изучение молекулярного состава отобранных УВ газов

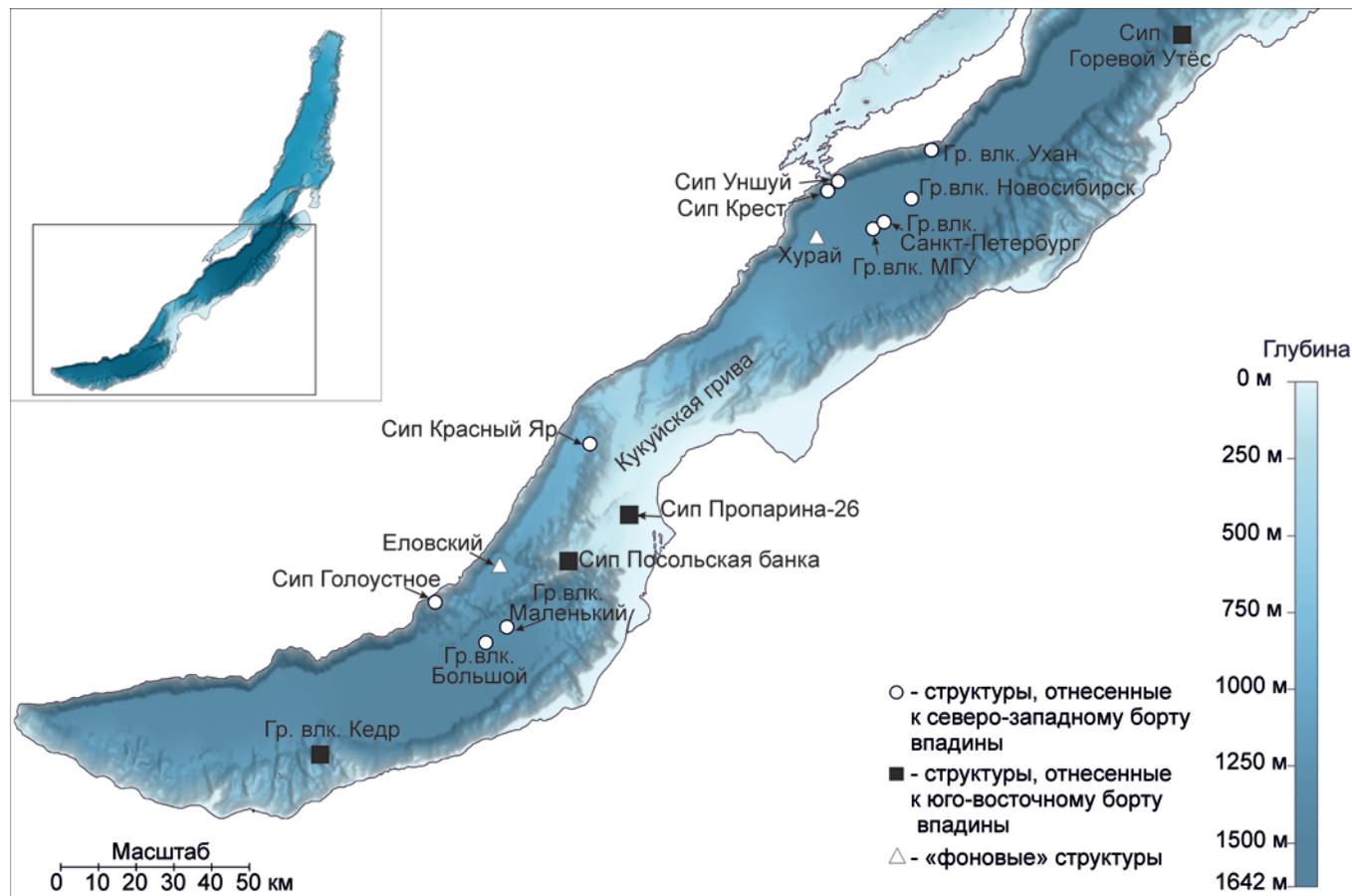


Рис. 2. Карта района исследования с положением структур опробования: Гр. влк. – грязевой вулкан

показало, что они на 100 % состоят из метана. Изотопный состав углерода метана изменяется от  $-88,7$  до  $-66,0$  ‰ VPDB, указывая на биогенное происхождение газов.

При изучении молекулярного состава газов из донных осадков отмечено, что в пробах, отобранных из структур разгрузки газа, расположенных вдоль юго-восточного борта байкальской впадины, содержится большое количество компонентов  $C_2-C_5$ , тогда как в газе северо-западного борта количество гомологов метана значительно меньше. Посчитанные отношения количества метана к количеству его гомологов в исследованных пробах, наряду с анализом изотопного состава углерода метана, позволили определить природу газа и оценить вклады сингенетической и эпигенетической составляющих в его составе.

Как известно, изотопный состав углерода метана определяется условиями генерации газа (Галимов, 1989). В самой верхней части осадочного разреза основная роль принадлежит процессам бактериального разложения органического вещества (ОВ), и образуется изотопно легкий метан с  $\delta^{13}C(CH_4)$  от  $-105$  до  $-75$  ‰ VPDB (Milkov, Etiope, 2005). С глубиной в осадочном бассейне происходит затухание активности микроорганизмов, главенствующую роль начинают играть процессы термоденатурации преобразования ОВ. Изотопный состав углерода вырабатываемого термогенного метана утяжеляется, значения  $\delta^{13}C(CH_4)$  варьируют от  $-55$  до  $-25$  ‰ VPDB (Milkov, Etiope, 2005). При этом, замечено, что гумусовое органическое вещество генерирует УВ газы изотопно более тяжелые, чем органическое вещество сапропелевого типа (Whiticar, 1994). Значения  $\delta^{13}C$  метана, из байкальских донных илов в местах разгрузки газа на дне, варьируют от  $-41,0$  до  $-72,7$  ‰ VPDB, указывая на смешанную природу изучаемых газов – на присутствие в пробах как биогенных, так и термогенных углеводородов. Также определено, что метан, разгружающийся из структур, расположенных вдоль юго-восточного борта байкальской впадины, показывает в целом относительно тяжелый изотопный состав углерода (от  $-57,2$  до  $-41,0$  ‰). В то же время изотопный

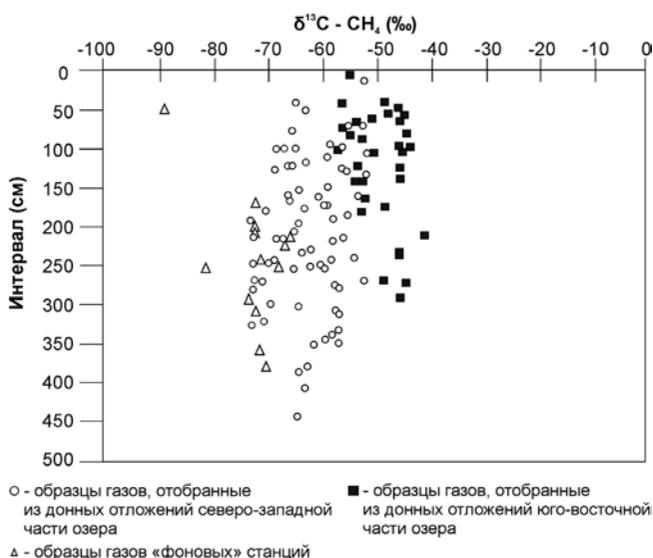


Рис. 3. Изотопный состав углерода метана газов из разных интервалов керна, отобранного в районах разгрузки УВ флюидов, тяготеющих к юго-восточному и северо-западному бортам впадины озера Байкал

состав углерода метана из прочих опробованных структур изотопно более легкий, и  $\delta^{13}C$  в нем варьирует в пределах от  $-72,7$  до  $-50,1$  ‰ (рис. 3).

Также весьма показательны выглядят результаты комбинированного анализа молекулярного ( $C_1/(C_2+C_3)$ ) и изотопного состава ( $\delta^{13}C(CH_4)$ ) углеводородных газов на модифицированной диаграмме Бернарда (рис. 4). Большинство изученных образцов на диаграмме расположены в центральной части со значениями  $C_1/(C_2+C_3)$  от 50 до 1000 и  $\delta^{13}C(CH_4)$  от  $-60$  ‰ до  $-40$  ‰ VPDB. Однако, образцы газов, отобранных из донных отложений юго-восточной части озера, имеют более тяжелый изотопный состав и большое количество компонентов  $C_{2+}$  в составе, в связи с чем эти газы в основном сконцентрированы в зоне, отвечающей нефтяным газам. Образцы газов, отобранных из донных осадков северо-западной части озера, имеют более легкий изотопный состав и содержат меньшее количество компонентов  $C_{2+}$ , в связи с чем большинство из них попадает в зону бактериального газа.

Однако не стоит судить о происхождении УВ газов исходя только из их молекулярного состава и изотопного состава углерода метана. Термогенные газы могут обогащаться метаном при молекулярном фракционировании в процессе миграции (Etiope et al., 2009). На значение изотопного состава углерода метана также сильное влияние оказывает бактериальная деятельность в донных осадках. Это связано в первую очередь с тем, что при наличии интенсивного восходящего потока природного газа создаются благоприятные условия для развития микробных процессов, и изотопное соотношение  $^{13}C/^{12}C$  термогенного метана маскируется добавлением значительной доли микробного газа из верхних горизонтов осадка. Для уточнения природы газа были проведены

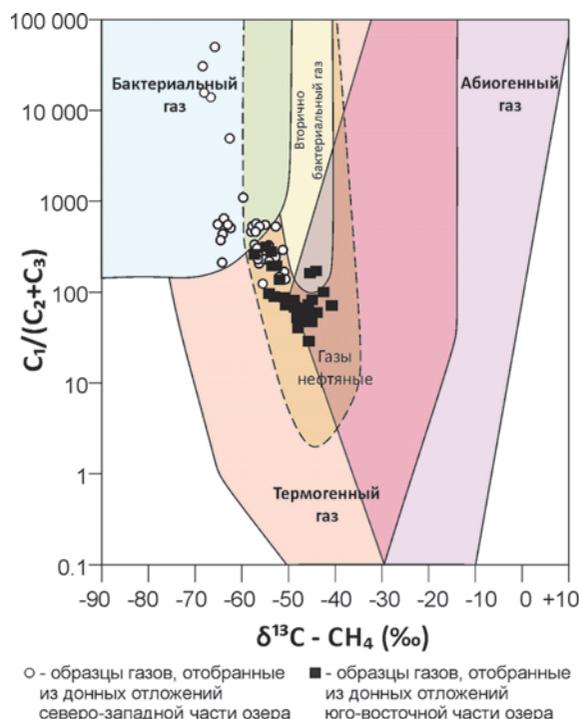


Рис. 4. Модифицированная диаграмма Бернарда – зависимость  $\delta^{13}C(CH_4)$  от  $C_1/C_{2+}$ , отражающая происхождение газа (Milkov, Etiope, 2018) – с нанесенными данными исследований газов донных илов озера Байкал

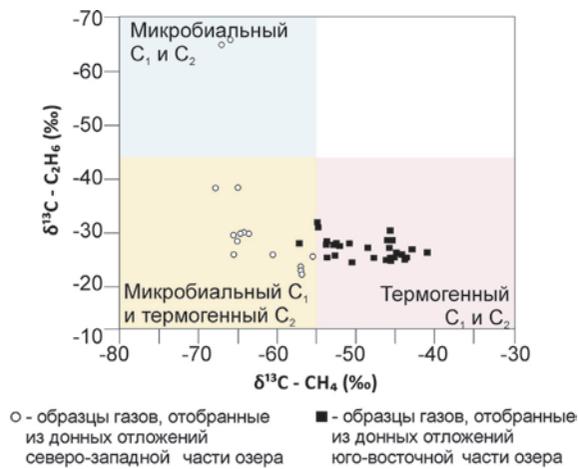


Рис. 5. Диаграмма зависимости  $\delta^{13}C (CH_4)$  от  $\delta^{13}C (C_2H_6)$ , отражающая происхождение газов (Milkov, Etiore, 2005), с нанесенными данными исследований газов донных шлов озера Байкал

исследования изотопного состава углерода этана (рис. 5). Изотопный состав этана почти для всех изучаемых образцов изменяется от -38 до -22 ‰ VPDB, свидетельствуя о его термогенном происхождении. Лишь для нескольких проб значения  $\delta^{13}C(C_2H_6)$  указывают на микробиальный этан, который встречается в некоторых районах оз. Байкал (Huchikubo et al., 2020).

Углерод этана образцов газов, отобранных из осадков юго-восточной части озера, показывает менее изменчивый изотопный состав, варьирующий в пределах от -32 до -25 ‰ VPDB, в то время как изотопный состав углерода этана, отобранного из осадков северо-западной части озера, изменяется в очень больших пределах от -65 до -22 ‰ VPDB. Подобные значения изотопного состава углерода этана также могут свидетельствовать о смешанном типе органического вещества в газоматеринской породе (Faber et al., 1988). Наши заключения об исходном органическом веществе не противоречат проведенным ранее исследованиям нефтей (Конторович и др., 2007).

## Выводы

Проведенные газогеохимические исследования донных осадков, а также анализ литературных данных позволили установить, что УВ газы и нефти Байкала, возможно, имеют общий источник с исходным органическим веществом смешанного сапропелево-гумусового типа. Определены и проанализированы особенности молекулярного и изотопного состава УВ газов из донных отложений северо-западной и юго-восточной частей озера:

1) В газах, отобранных из структур юго-восточной части озера, присутствует большее количество гомологов метана, чем в газах, отобранных из структур северо-западной части озера;

2) Для газов из осадков юго-восточных структур характерен более тяжелый изотопный состав углерода метана (от -57,2 до -41,0 ‰ VPDB), а для газов из структур северо-западной части – более легкий (от -72,7 до -50,1 ‰ VPDB).

3) Изотопный состав углерода этана в газах, отобранных из донных отложений северо-западной части озера, варьирует в широких пределах от -65 до -22 ‰ VPDB,

в отличие от газов, отобранных из донных отложений юго-восточной части озера, в которых изотопный состав углерода этана изменяется от -32 до -25 ‰ VPDB.

Столь существенное различие в молекулярном и изотопном составе газов северо-западной и юго-восточной частей озера может быть связано со сложным асимметричным строением Байкальского рифта, что влияет на основные механизмы миграции газов из глубин к поверхности дна. Так, юго-восточная часть озера характеризуется менее мощным осадочным чехлом, а также наличием большого количества разломов, что позволяет газам мигрировать путем фильтрации, при этом газы претерпевают меньшие изменения в процессе молекулярного и изотопного фракционирования. А в северо-западной части озера, напротив, наибольшая мощность осадочного наполнения определяет миграцию газа преимущественно диффузионным способом, что приводит к значительным изменениям в его составе.

Молекулярное и изотопное фракционирование, связанное с геохимическими процессами, может предоставить полезную информацию для лучшего понимания корреляций между газами на дневной поверхности и подповерхностными резервуарными газами, а также дает представление о значимости геохимических характеристик газов при оценке миграции углеводородов.

## Финансирование/Благодарности

Организация и проведение экспедиционных работ проекта Class@Baikal финансируются за счет средств геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, международного проекта Норвежского Исследовательского Совета HOTMUD (проект № 288299), ЛИН СО РАН (проект №121032300223-1) и спонсорской поддержки ООО «ЦМИ МГУ». Анализ собранного материала частично выполнен в рамках стратегического проекта №3 Программы Приоритет-2030 СевГУ.

Авторы признательны рецензенту за подробный разбор статьи и приведенные замечания.

## Литература

- Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А. и др. (2018). Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз. Байкал. *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*, 5, с. 111–116. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-5-111-116>
- Большаков А.М., Егоров, А. В. (1987). Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях. *Океанология*, 27(5), с. 861–862.
- Вассоевич Н.Б. (1967). Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние). *Изв. АН СССР. Сер. Геол.*, 11, с. 135–156.
- Вицищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А. и др. (2021). Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал). *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, 3, с. 3–16. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-3-3-16>
- Габриэлянц Г.А. (2003). Геология нефтяных и газовых месторождений. М: Недра, 65 с.
- Галазий Г.И. (1993). Байкал: Атлас. М: Изд-во Федеральной службы геодезии и картографии России.
- Галимов Э.М. (1989). Источники и механизмы образования углеводородных газов в осадочных породах. *Геохимия*, 2, с. 163–180.
- Гольмштот А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р. и др. (1997). Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газовых гидратов. *Геология и геофизика*, 38(10), с. 1677–1691.

- Исаев В.П. (2013). Иркутская нефть. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*, 1, с. 80–90.
- Исидоров В.А. (1985). Органическая химия атмосферы. Химия. Ленингр. отд-ние. 264 с.
- Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М. (2006). Генетические типы метана озера Байкал. *Доклады академии наук*, 411(5), с. 672–675. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06090285>
- Калмычков Г.В., Покровский Б.Г., Хачикубо А., Хлыстов О.М. (2017). Геохимические характеристики метана из осадков подводной возвышенности Посольская Банка (озеро Байкал). *Литология и полезные ископаемые*, 2, с. 121–129. <https://doi.org/10.7868/S0024497X17020057>
- Калмычков Г.В., Егоров А.В., Хачикубо А., Хлыстов О.М. (2019). Угледородные газы подводного нефтегазового проявления Горевой утес (оз. Байкал, Россия). *Геология и геофизика*, 60(10), с. 1488–1495. DOI: 10.15372/GiG2019110
- Конторович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. (2007). Нефтегазоносность отложений озера Байкал. *Геология и геофизика*, 48(12), с. 1346–1357.
- Логачев Н.А. (2003). История и геодинамика Байкальского рифта. *Геология и геофизика*, 44(5), с. 391–406.
- Мац В.Д. (2015). Байкальский рифт: плиоцен (миоцен)-четвертичный эпизод или продукт длительного развития с позднего мела под воздействием различных тектонических факторов. Обзор представлений. *Геодинамика и тектонофизика*, 6(4), с. 467–489. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0190>
- Старобинец И.С., Петухов А.В., Зубайраев С.Л. (1993). Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений. М: Недра.
- Хаин В.Е. (2005). Байкальская рифтовая система. Большая российская энциклопедия. Гл. ред. Ю. С. Осипов. Москва, 662 с.
- Хлыстов О.М., Земская Т.И., Ситникова Т.Я. и др. (2009). Донные битумные постройки и населяющая их биота по данным обследования озера Байкал с глубоководных обитаемых аппаратов “МИР”. *Доклады Академии наук*, 428(5), с. 682–685. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09080200>
- Etioppe G., Feyzullayev A., Milkov A. V., et al. (2009). Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), pp. 1692–1703. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001>
- Faber E., Gerling P., Dumke I. (1988). Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling. *Organic Geochemistry*, 13(4-6), pp. 875–879. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90240-9](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90240-9)
- Hachikubo A., Minami H., Yamashita S. et al. (2020). Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal). *Scientific reports*, 10(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71410-2>
- Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P. et al. (1992). Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology*, 20(7), pp. 589–592. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Khlystov O., Khabuev A.V., Minami H., et al. (2018). Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 1, pp. 66–70. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66>
- Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A. et al. (2019). Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. *Marine and Petroleum Geology*, 102, pp. 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005>
- Mats V.D., Khlystov O.M., De Batist M. et al. (2000). Evolution of the Academian Ridge Accommodation Zone in the central part of the Baikal Rift, from high-resolution reflection seismic profiling and geological field investigations. *International Journal of Earth Sciences*, 89(2), pp. 229–250. <https://doi.org/10.1007/s005310000094>
- Milkov A.V., Etioppe G. (2005). Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate—a comment. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3), pp. 490–492. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0480-5>
- Milkov A.V., Etioppe G. (2018). Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20,000 samples. *Organic Geochemistry*, 125, pp. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.09.002>
- Whiticar M.J. (1994). Correlation of Natural Gases with Their Sources. <https://doi.org/10.1306/M60585C16>

## Сведения об авторах

**Олеся Николаевна Видищева** – ведущий инженер кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

**Григорий Георгиевич Ахманов** – кандидат геол.-мин. наук, доцент кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Региональные климатические системы», Севастопольский государственный университет

Россия, 299053, Севастополь, ул. Университетская, д. 33

**Екатерина Валерьевна Кислицына** – специалист по моделированию углеводородных систем, ООО «Бейсип-GeoТехнологии»

Россия, 117312, Москва, ул. Вавилова, д. 47а

**Адриано Маццини** – кандидат геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник Центра эволюции Земли и динамики, Университет Осло

Норвегия, 0316, Осло, Сем Саеландсвей 2А, Блиндерн

**Анна Юрьевна Мальцева** – кандидат геол.-мин. наук, научный сотрудник центра добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий

Россия, 143026, Москва, ул. Нобеля, д. 3

**Елена Николаевна Полудеткина** – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

**Елена Андреевна Бакай** – кандидат геол.-мин. наук, старший научный сотрудник кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

**Ирина Энверовна Манько** – специалист кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

**Дмитрий Вячеславович Корост** – кандидат геол.-мин. наук, научный сотрудник Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Россия, 119234, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1

**Олег Михайлович Хлыстов** – заведующий лабораторией геологии оз. Байкал, Лимнологический институт СО РАН

Россия, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, д. 3

Статья поступила в редакцию 09.04.2022;  
Принята к публикации 04.05.2022; Опубликована 16.05.2022

## Variations in molecular and isotopes composition of seepage gases in the north-western and south-eastern parts of Lake Baikal

O.N. Vidishcheva<sup>1\*</sup>, G.G. Akhmanov<sup>1,2</sup>, E.V. Kislitsyna<sup>3</sup>, A. Mazzini<sup>4</sup>, A.Yu. Mal'tseva<sup>5</sup>, E.N. Poludetkina<sup>1</sup>, E.A. Bakay<sup>1</sup>, I.E. Man'ko<sup>1</sup>, D.V. Korost<sup>1</sup>, O.M. Khlystov<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

<sup>3</sup>Beicip-Franlab, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>University of Oslo, Oslo, Norway

<sup>5</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech), Moscow, Russian Federation

<sup>6</sup>Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

\*Corresponding author: Olesya N. Vidishcheva, e-mail: vid6877@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents results of gas-geochemical studies of bottom sediments and petroleum potential assessment of Baikal Rift Basin. During the expeditions of the Class@Baikal project in 2014–2019, gases from the Lake Baikal bottom sediments were analyzed. The results showed a clear difference in chemical and isotopic composition of the seeping gases collected in the northwestern and southeastern parts of the lake. The seepage released from northwest part were relatively enriched by methane and had a low concentration of C<sub>2+</sub> compounds. The seepage gases had relatively lighter carbon isotopes composition of CH<sub>4</sub> (from -72,7 to -50,1 ‰ VPDB) and the high variability of δ<sup>13</sup>C in C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (from -65 to -22 ‰ VPDB). The gases released from southeastern part of the lake had an increase in C<sub>2+</sub> compounds and had relatively lighter carbon isotopes composition of methane (from -57,2 to -41,0 ‰ VPDB). The carbon isotopes composition of ethane varies from -32 to -25 ‰ VPDB. Asymmetric structure of the Baikal rift basin and various processes of gas migration within it might cause the variations. Diffusive process led to the lighter carbon isotopes composition of the seepage gases from the northwestern part of lake and the gas molecular composition enrichment by methane. Such molecular and isotopic fractionations caused by geochemical processes helps to understand the migration of gas from source rocks to the earth's surface. Similar geochemical indicators of fractionation should be taken into consideration when assessing oil and gas source rocks and basin potential from gas geochemical studies data.

**Keywords:** Lake Baikal, continental rifting, gas geochemistry, methane seeps

**Recommended citation:** Vidishcheva O.N., Akhmanov G.G., Kislitsyna E.V., Mazzini A., Mal'tseva A.Yu., Poludetkina E.N., Bakay E.A., Man'ko I.E., Korost D.V., Khlystov O.M. (2022). Variations in molecular and isotopes composition of seepage gases in the north-western and south-eastern parts of Lake Baikal. *Georesursy = Georesources*, 24(2), pp. 209–216. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.19>

### Acknowledgements

The Class@Baikal program and its expeditions were supported by the Geological Faculty of Lomonosov Moscow State University, the Research Council of Norway (NFR) through the HOTMUD project (no. 288299), LIN SB RAS (project no. 121032300223-1) and by Marine Research

Center of Lomonosov Moscow State University. Collected data analysis was, in part, carried out within the program 'Prioritet-2030' of Sevastopol State University (strategic project no. 3).

### References

- Akhmanov G.G., Khlystov O.M., Solovyeva M.A. et al. (2018). Newly discovered hydrate-bearing structure in Lake Baikal. *Moscow University Geology Bulletin*, 73(6), pp. 582–587. <https://doi.org/10.3103/S0145875218060029>
- Bolshakov A.M., Egorov A.V. (1987). On the use of the technique of phase-equilibrium degassing in gasometric studies. *Okeanologiya*, 27(5), pp. 861–862. (In Russ.)
- Etiopie G., Feyzullayev A., Milkov A.V., et al. (2009). Evidence of subsurface anaerobic biodegradation of hydrocarbons and potential secondary methanogenesis in terrestrial mud volcanoes. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), pp. 1692–1703. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001>
- Faber E., Gerling P., Dumke I. (1988). Gaseous hydrocarbons of unknown origin found while drilling. *Organic Geochemistry*, 13(4-6), pp. 875–879. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90240-9](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90240-9)
- Gabrielyants G.A. (2003). *Geology of oil and gas fields*. Moscow: Nedra, 65. (In Russ.)
- Galaziy G.I. (1993). *Baykal: Atlas*. Moscow: Federal Service for Geodesy and Cartography of Russia. (In Russ.)
- Galimov E. M. (1988). Sources and mechanisms of formation of gaseous hydrocarbons in sedimentary rocks. *Chemical Geology*, 71(1–3), pp. 77–95. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90107-6](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90107-6)
- Golmshtok A.Y., Duchkov A.D., Hutchinson D.R. et al. (1997). Estimation of heat flow on Baikal from seismic data on the lower boundary of the gas hydrate layer. *Geologiya i geofizika*, 38(10), pp. 1677–1691. (In Russ.)
- Hachikubo A., Minami H., Yamashita S. et al. (2020). Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal). *Scientific reports*, 10(1), pp. 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71410-2>
- Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P. et al. (1992). Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data. *Geology*, 20(7), pp. 589–592. <https://doi.org/10.1130/0091-7613>
- Isaev V.P. (2013). Oil of Irkutsk. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle = The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 1, pp. 80–90. (In Russ.)
- Isidorov V.A. (1985). *Organic chemistry of the atmosphere*. Leningrad. (In Russ.)
- Kalmychkov G.V., Egorov A.V., Kuz'min M.I., Khlystov O.M. (2006). Genetic types of methane from Lake Baikal. *Dokl. Earth Sc.*, 411, pp. 1462–1465. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06090285>
- Kalmychkov G.V., Pokrovsky B.G., Hachikubo A., Khlystov O.M. (2017). Geochemical characteristics of methane from sediments of the underwater high Posolskaya Bank (Lake Baikal). *Lithol Miner Resour.*, 52, pp. 102–110. <https://doi.org/10.1134/S0024490217020055>
- Kalmychkov G.V., Egorov A.V., Hachikubo A., Khlystov O.M. (2019). Hydrocarbon Gases of the Gorevoi Utes Underwater Oil-Gas Seep (Lake Baikal, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 60(10), pp. 1188–1194. <https://doi.org/10.15372/RGG2019110>

- Khain V.E. (2005). Baikal Rift System. Great Russian Encyclopedia. Ed. Yu.S. Osipov. Moscow, 662 p. (In Russ.)
- Khlystov O.M., Zemskaya T.I., Sitnikova T.Y. et al. (2009). Bottom bituminous constructions and biota inhabiting them according to investigation of Lake Baikal with the Mir submersible. *Doklady Earth Sciences*, 429(1), p. 1333. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09080200>
- Khlystov O., Khabuev A.V., Minami H., et al. (2018). Gas hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 1, pp. 66–70. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-66>
- Khlystov O.M., Poort J., Mazzini A. et al. (2019). Shallow-rooted mud volcanism in Lake Baikal. *Marine and Petroleum Geology*, 102, pp. 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.005>
- Kontorovich A.E., Kashirtsev V.A., Moskvina V.I. et al. (2007). Petroleum potential of Baikal deposits. *Russian geology and geophysics*, 48(12), pp. 1046–1053. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.004>
- Logachev N.A. (2003). History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika*, 44(5), pp. 391–406 (373–387). (In Russ.)
- Mats V.D. (2015). The Baikal rift: Pliocene (Miocene) – Quaternary episode or product of extended development since the Late Cretaceous under various tectonic factors. A review. *Geodynamics & Tectonophysics*, 6(4), pp. 467–490. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-4-0190>
- Mats V.D., Khlystov O.M., De Batist M. et al. (2000). Evolution of the Academian Ridge Accommodation Zone in the central part of the Baikal Rift, from high-resolution reflection seismic profiling and geological field investigations. *International Journal of Earth Sciences*, 89(2), pp. 229–250. <https://doi.org/10.1007/s005310000094>
- Milkov A.V., Etiope G. (2005). Global methane emission through mud volcanoes and its past and present impact on the Earth's climate—a comment. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3), pp. 490–492. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0480-5>
- Milkov A.V., Etiope G. (2018). Revised genetic diagrams for natural gases based on a global dataset of > 20,000 samples. *Organic Geochemistry*, 125, pp. 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.09.002>
- Starobinets I.S., Petukhov A.V., Zubayraev S.L. (1993). Fundamentals of the theory of geochemical fields of hydrocarbon accumulations. Moscow: Nedra. (In Russ.)
- Vasoevich N.B. (1967). Theory of sedimentary-migration origin of oil (historical review and current state). *Izv. AN SSSR. Ser. Geol*, 11, pp. 135–156. (In Russ.)
- Vidishcheva O.N., Akhmanov G.G., Solovyeva M.A. et al. (2021). Hydrocarbon Gas Seepage along the Gydratny Fault (Lake Baikal). *Moscow University Geology Bulletin*, 76(4), pp. 353–365. <https://doi.org/10.3103/S0145875221040116>
- Whiticar M.J. (1994). Correlation of Natural Gases with Their Sources. <https://doi.org/10.1306/M60585C16>
- About the Authors**
- Olesya N. Vidishcheva* – Engineer, Petroleum Geology Department  
Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
- Grigori G. Akhmanov* – PhD (Geology and Mineralogy); Associate Professor, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University; Senior Researcher, Laboratory of Regional Climate Systems, Sevastopol State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation  
33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russian Federation
- Ekaterina V. Kislitsyna* – Expert, Hydrocarbon systems modeling, Beicip-Franlab  
47a, Vavilova st., Moscow, 117312, Russian Federation
- Adriano Mazzini* – PhD (Geology and Petroleum Geology), Leading Researcher, Centre for Earth Evolution and Dynamics (CEED), University of Oslo  
Sem Sælands vei 2A, Blindern, Oslo, 0316, Norway
- Anna Yu. Mal'tseva* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Center for Hydrocarbon Recovery, Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech)  
3, Nobelya st., Moscow, 143026, Russian Federation
- Elena N. Poludetkina* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
- Elena A. Bakay* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
- Irina E. Man'ko* – Expert, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
- Dmitriy V. Korost* – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University  
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
- Oleg M. Khlystov* – Head of the Laboratory, Geology of the Lake Baikal, Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.  
Ulan-Batorskaya st., 3, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Manuscript received 9 April 2022;

Accepted 4 May 2022; Published 16 May 2022