

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Видищева Олеся Николаевна

**Особенности генерации и миграции углеводородных флюидов
в рифтовом бассейне озера Байкал**

Специальность 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация
нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва-2023

Работа выполнена на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: ***Ахманов Григорий Георгиевич***
кандидат геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты: ***Каширцев Владимир Аркадьевич***
доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики имени А.А. Трофимука СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории геохимии нефти и газа

Семилетов Игорь Петрович
доктор географических наук, член-корр. РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, зав. лабораторией арктических исследований

Бушнев Дмитрий Алексеевич
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, заведующий лаборатории органической геохимии

Защита состоится «14» апреля 2023 г. в 14.30 часов минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.8 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, геологический факультет, ауд.621

E-mail: poludetkinaelena@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.8/2421>.

Автореферат разослан «10» марта 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук

 - Е.Н. Полудеткина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Совершенствование методов поиска месторождений нефти и газа – важнейшая научно-прикладная задача комплекса наук о Земле. В обозримом будущем разведанные запасы углеводородов будут оставаться гарантом надежного обеспечения развития экономики страны. Сырьевая база многих нефтегазоносных регионов России имеет высокий показатель выработанности запасов. Ключевым направлением исследований для прироста запасов становится нефтегеологическое изучение сложнопостроенных осадочных бассейнов, таких как бассейны рифтовых впадин. Несмотря на то, что рифтогенез играет первостепенную роль в заложении, а рифтовые комплексы присутствуют в основании большинства осадочных бассейнов, геология рифтовых впадин еще мало изучена с позиций фундаментальной нефтяной геологии. Озеро Байкал занимает центральную часть современной Байкальской рифтовой зоны и является уникальным объектом для изучения. Наличие большого количества нефте- и газопроявлений на его дне, а также присутствие газовых гидратов предполагает генерацию углеводородных (УВ) флюидов в осадочном выполнении рифта и их миграцию к поверхности в настоящее время. *Выполненный научный анализ нефте-, газо- и битумопроявлений в этом регионе и его увязка с геологическим строением имеют важное значение для понимания процессов нефте- и газообразования во внутриконтинентальных рифтовых бассейнах.*

Геохимическая съемка – универсальный инструмент поиска месторождений углеводородов при работе на акваториях. Растущий уровень современной приборной и аналитической базы геохимии постоянно повышает достоверность прогноза нефтегазоносности территорий/акваторий при учете достижений фундаментальной науки. Среди важных фундаментально-научных проблем поисковой геохимии выделяются: необходимость уточнения механизмов миграции УВ соединений из залежей к поверхности; понимание процессов и оценка масштабов изменений УВ компонентов на путях миграции; выяснение, как эти процессы отражаются в поверхностных геохимических полях, и определение причин различий состава УВ в глубинных и поверхностных горизонтах разреза. Научная задача с важнейшими прикладными аспектами для нефтепоисковой геохимии - уверенное «опознание» термогенной и микробной составляющих в УВ

смеси, разгружающейся на поверхности. *Представленные в работе результаты комплексных геологических и геохимических исследований процессов фокусированной и фоновой разгрузки флюидов на дне озера Байкал позволяют расширить научную базу поиска скоплений углеводородов при работах на акваториях.*

Вышеозначенные аспекты выполненных исследований определяют актуальность настоящей работы.

Цели и задачи исследования. Целью настоящей работы является выявление особенностей процессов генерации и миграции углеводородных флюидов рифтового бассейна озера Байкал.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- охарактеризовать УВ газы, разгружающиеся в пределах Байкальской впадины, определить их типовые составы;
- соотнести с определенными типами все выходы УВ газов на поверхность дна Байкала и проанализировать их пространственное распределение;
- выявить факторы, формирующие различия в составе УВ газов, разгружающихся со дна озера; оценить относительный вклад разных факторов;
- дать характеристику уровня преобразованности и положения в разрезе потенциальной нефтегазоматеринской толщи (НГМТ);
- определить нефтегазогенерационный потенциал предполагаемой НГМТ.

Фактический материал и методы исследования. Материал собран автором в ходе семи международных научно-исследовательских экспедиций Class@Baikal в рамках программы «Обучение через исследование» в 2014-2022 годах. Всего было изучено более 4000 образцов газов из донных осадков, отобранных в пределах структур активной газоразгрузки и за их пределами; 3 пробы капельно-жидкой нефти из отложений в районе структуры нефтewысачивания Горевой Утес, 1 проба битума из поверхностной битумной постройки на Горевом Утёсе, 2 образца угля из обнажений танхойской свиты на юго-восточном побережье. При комплексном анализе также использовались данные сейсмоакустических исследований.

Для всех образцов газа был исследован молекулярный состав, для 400 образцов был изучен изотопный состав углерода углеводородных и углекислого газов, для 6 образцов померен изотопный состав водорода метана. В комплексной

интерпретации также учитывались результаты анализов молекулярного и изотопного состава газов, опубликованные коллегами в нескольких научных статьях. Для образцов нефти и битума было проведено исследование методом хроматомасс-спектрометрии и последующий биомаркерный анализ. Из образцов углей были изготовлены аншлифы и исследованы петрографические свойства. Для оценки нефтегазогенерационного потенциала был проведен пиролитический анализ углей и последующее лабораторное моделирование процессов созревания органического вещества в автоклаве. Продукты гидротермолиза углей изучались молекулярными и изотопными методами.

Личный вклад автора. Автор лично принимал участие в экспедициях в акватории озера Байкал в 2014, 2015, 2018, 2019 и 2022 гг., а также проводил исследование всего имеющегося фактического материала, включая молекулярный и изотопный анализ проб газа, пробоподготовку и биомаркерный анализ проб нефти и битума, осуществил эксперимент с гидротермолизом углей и последующим сбором и анализом полученных компонентов, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Научная новизна. Впервые на представительной коллекции образцов газов из донных илов показано различие в составе углеводородов, разгружающихся на дне Байкала на обширных прибортовых участках северо-западного и юго-восточного бортов рифтовой впадины, выявлены факторы, определяющие такое различие.

Рассчитан вклад термогенного и микробиального газа в общую смесь разгружающихся газов для 20 структур флюидоразгрузки на дне озера Байкал.

Для осадочного выполнения котловины Байкала описаны и проанализированы особенности тектонического и литологического контроля миграции УВ газов.

Установлены различия зрелости потенциальной нефтегазоматеринской толщи в северо-восточной и юго-западной частях впадины Байкала.

Оценен нефтегазогенерационный потенциал углей олигоцен-плиоценового возраста, как потенциальной нефтегазоматеринской толщи озера Байкал.

Теоретическая и практическая значимость. Выводы и заключения, сделанные в работе, могут быть востребованы при:

- оценке нефтегазоносного потенциала рифтовых бассейнов различных регионов мира, в т.ч. погребенных и составляющих отдельный структурный этаж с собственной уникальной нефтяной системой, построении геологических моделей для подсчета ресурсов УВ;

- поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых, приуроченных к осадочному выполнению рифтовых бассейнов, уверенной интерпретации данных дистанционных методов изучения;

- разработке оптимального комплекса полевых и лабораторных исследований для геохимической съемки с целью поиска залежей углеводородов на акваториях.

Защищаемые положения.

(1) Преимущественно микробиальный газ с преобладанием в составе метана, изотопно легкого по углероду, разгружается вдоль северо-западного борта впадины Байкала. Вдоль юго-восточного борта характерно высачивание (сипы) термогенного газа с повышенным содержанием соединений C_2+ и метаном, обогащенным тяжелым изотопом углерода.

(2) Различие в составе разгружающихся флюидов северо-западной и юго-восточной частей озера Байкал определяется тремя факторами:

- разные пропорции приповерхностного (микробиального) и более глубинного (термогенного) газов в разгружающейся смеси;
- различная интенсивность/степень молекулярного и изотопного фракционирования газов на путях миграции к поверхности;
- разные глубины залегания и уровни преобразованности нефтегазоматеринских отложений.

На участках рассеянной разгрузки флюидов проявляются все три фактора. Для зон фокусированной разгрузки определяющим является фактор, связанный с характеристиками нефтегазоматеринской толщи.

(3) Геохимические характеристики разгружающихся флюидов свидетельствуют о различной степени катагенетической преобразованности исходного органического вещества потенциальной нефтегазоматеринской толщи. Продемонстрирована генетическая связь нефти и газов с погребенной угленосной толщей, аналогом которой может являться танхойская свита (олигоцен-плиоцен), обнажающаяся на восточном побережье озера.

Степень достоверности и апробация результатов. Работа отвечает высокому научно-методическому уровню. Примененные методы соответствуют поставленным задачам. Контроль за качеством осуществлялся по государственным, межлабораторным, и внутрилабораторным стандартам. Достоверность полученных в ходе исследования результатов подтверждена большой выборкой образцов. Основные результаты исследований доложены на научных семинарах и представлены на 35 конференциях в период с 2014 по 2022 гг. Среди них следует отметить ежегодные выступления на международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование» MARESEDU, г. Москва (2014-2022), European Geosciences Union General Assembly, Австрия (2016, 2020, 2022), на 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021), Франция (2021), на Международной научной конференции, посвящённой 150-летию Севастопольской биологической станции — Института биологии южных морей имени А.О. Ковалевского и 45-летию НИС «Профессор Водяницкий», Севастополь, (2021), на VII-th Vereshchagin Baikal Conference (Веб-конференция с онлайн трансляцией докладов), Россия (2020), на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана» («КИМО-2020»), г. Калининград (2020), на Международной научно-практической конференции «Новые идеи в геологии нефти и газа», г. Москва (2019), на международной научно-практической конференции и выставке «ГеоЕвразия-2019», г. Москва (2019).

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 6 работах: 3 статьи опубликованы в журналах Scopus, Web of Science (WoS), RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности; 3 – в других сборниках и журналах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, заключения, 4 глав, списка литературы из 290 наименований, иллюстрирована 44 рисунками и включает 5 таблиц, содержит 122 страницы текста.

Благодарности. Диссертационная работа подготовлена на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Глубокую признательность автор выражает своему научному руководителю доценту Ахманову Григорию Георгиевичу за постоянное внимание, поддержку и содействие в подготовке данной работы.

Автор выражает особую благодарность Полудеткиной Елене Николаевне, Калмыкову Георгию Александровичу и Калмыкову Антону Георгиевичу за помощь и консультации по оформлению работы. За внимание к работе и рекомендации по оформлению доклада автор сердечно благодарен Жемчуговой Валентине Алексеевне.

За помощь в работе с фактическим материалом, квалифицированные советы автор искренне признателен Э.А. Абле, С.В. Фролову, Е.А. Бакай, М.А. Большаковой. Отдельную благодарность автор выражает А.Ю. Мальцевой (Юрченко) и И.Э. Манько за помощь в анализе образцов газов, Н.В. Прониной за помощь в углепетрографическом анализе, Г.Г. Савостину за помощь в постановке эксперимента по гидротермолизу. Автор благодарит всех сотрудников кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых за полученные знания и навыки, поддержку и советы.

Автор благодарит Хлыстова Олега Михайловича и всех участников экспедиций проекта Class@Baikal, так как только совместные работы на борту судна и обработка материала после экспедиции помогли получить качественные данные, на основании которых строилась работа.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Характеристика района работ

1.1. История изучения нефтяных и газовых проявлений озера Байкал

Просачивания нефти на восточном берегу Байкала были известны с древних времен. В 1833 году в ходе экспедиции члена Петербургской академии наук И.Г. Гмелина некоторые из них были впервые научно задокументированы. Первые нефтепоисковые буровые работы проводились с 1903 под руководством В.Д. Рязанова, а затем Г.Е. Рябухина. Всего в Байкальском нефтегазоносном регионе было пробурено более 30 скважин в период по 1941 гг., в некоторых из них было зафиксировано битумонасыщение пород. Позже были пробурены еще несколько структурно-поисковых скважин, нефтепроявления в которых не были обнаружены.

Первые попытки исследования состава байкальской нефти относятся к концу 19 - началу 20 веков. В 1874 г. А.А. Шмарин исследовал «морской воск» озера Байкал. С середины 20-х годов прошлого столетия нефтеносность Байкала изучали Г.Ю. Верещагин, Г.Е. Рябухин, позднее - С.П. Ситников, Л.С. Петров, Е.В.

Кравченко, В.Г. Васильев, С.Г. Саркисян, А.И. Левин, В.В. Самсонов, Г.П. Пономарева и другие. Было предложено три гипотезы происхождения байкальских битумов: (1) миграция нефтей из кембрийских нефтепроизводящих толщ, находящихся в поднадвиговой зоне восточного берега озера (В. А. Успенский и А. И. Горская, С. П. Ситников); (2) абиогенный мантийный генезис углеводородов (Н. А. Кудрявцев, В.В. Ломакин); (3) генерация нефти нефтематеринскими отложениями в составе кайнозойского осадочного выполнения Байкальской рифтовой впадины (Е.А. Пресняков, Е.В. Кравченко, В.Г. Васильев, Г.Е. Рябухин, В.В. Самсонов).

В начале 60-х годов нефтегазопроисследовательские работы на Байкале были прекращены, и изучение нефтегазоносности Байкальской впадины возобновилось лишь в 90-е годы 20-го столетия. Были проведены первые многоканальные сейсмические исследования, в 1993 году стартовал международный проект «Байкал-бурение». Исследования образцов нефти из нефтепроявления Горевой Утес показали, что нефтематеринские отложения впадины Байкала имеют озерно-дельтовое происхождение и меловой или более поздний возраст (Каширцев и др., 2006; Конторович и др., 2007), что существенно отличает углеводороды Байкала от верхнепротерозойских и кембрийских нефтей, известных на Сибирской платформе.

Дно Байкальской впадины характеризуется широким распространением большого количества структур фокусированной разгрузки газов, а также наличием протяженного газогидратного слоя в верхних частях осадочного разреза. Газы донных отложений озера Байкал изучались с конца 70-х годов прошлого столетия (Ефремова и др., 1980; Лебедь и др., 1984; Носов и др., 1987; Исаев, 2001; Коллектив..., 1998; Калмычков и др., 2006, 2017, 2019; Nachikubo et al., 2010, 2020). Было установлено, что на дне озера происходит разгрузка как углеводородных микробных (сингенетических) газов, так и термогенных (мигрировавших из зон катагенеза к поверхности). Главные источники газа Байкальских осадочных бассейнов предполагаются в проторифтовом и среднерифтовом миоцен-плиоценовых комплексах (Исаев и др., 2002).

На настоящий момент только 600 м из более чем семикилометровой осадочной толщи Байкальского рифта охарактеризовано бурением, и только в одной точке (Кузьмин и др., 2001). Предположения о нефтегазоматеринской толще (НГМТ)

Байкала могут базироваться лишь на результатах исследований УВ флюидов, разгружающихся на дне озера. Современные методики, лабораторная и аналитическая базы открывают новые возможности существенно расширить и детализировать сложившиеся представления.

1.2. Геологическое строение и нефтегазоносность района исследований

Байкальская рифтовая зона находится в центре Азиатского континента и состоит из серии впадин, крупнейшей из которых является озеро Байкал. Протяженность озера Байкал составляет 636 км, при ширине от 27 км (напротив дельты р. Селенга) до 81 км (в средней части озера).

История формирования и развития Байкальского рифта до сих пор весьма дискуссионна. По одной версии Байкальский рифт начал образовываться около 70 млн. лет назад (Мац, 2011), другие исследователи считают - около 30 млн. лет назад (Логачев, 2003). Байкальская рифтовая впадина, вероятно, формировалась в несколько этапов, характеризующихся различными геодинамическими обстановками, и продолжает свое развитие в настоящее время. Описанию ее геологического строения и тектоники посвящено множество работ (Балуев и др., 2001; Зоненштайн и др., 1979; Зорин и др., 1995; Кузьмин и др., 200; Логачев и др., 1974; Мац, 2012; Цеховский, Леонов, 2007 и многие другие). В современном тектоническом плане озера Байкал по данным многоканального сейсмического профилирования выявлены следующие особенности (Зоненштайн и др., 1992):

- асимметричное строение – Байкальский рифт состоит из серии полуграбенов с крутыми СЗ и пологими ЮВ крыльями;
- существование сбросовой лестницы, погружающейся с СЗ на ЮВ с вращением и наклоном блоков.

В пределах рифтовой зоны широко проявлены неотектонические движения, синрифтовое осадконакопление и высокий тепловой поток. Морфологически внутри Байкальской впадины отчетливо выделяются три элемента — это Южно-, Средне- и Северо-Байкальская котловины. Они, в свою очередь, неоднородны по внутренней структуре и состоят из более мелких депрессий, отличающихся по своему тектоническому развитию и осадконакоплению (Леви и др., 1997).

Байкальская впадина вмещает мощную (до 7,5-8,0 км) осадочную толщу. Возраст самых древних отложений Байкальской впадины до сих пор является весьма

дискуссионным вопросом. Литолого-стратиграфическая характеристика разреза Байкальской впадины приводится на основании результатов сейсмостратиграфических работ (Levi et al., 1997; Хатчинсон и др., 1993; Зоненштайн и др., 1995; Казьмин и др., 1995; Мац и др., 2010), а также глубоководного бурения. Самая глубокая скважина вскрыла на глубине 585 м ниже дна озера отложения с возрастом 8,9 млн. лет (поздний миоцен) (Кашик, Ломоносова, 2006; Кузьмин и др., 2014; Kravchinsky, 2017). Согласно этим данным, Южная и Центральная впадины Байкала характеризовались схожими обстановками осадконакопления и, вероятно, были гидродинамически связаны, что предопределило похожий литологический облик толщ осадочного заполнения. Так, во впадинах центральной части Байкальской рифтовой зоны был обозначен единый процесс осадконакопления угленосной свиты миоцена–нижнего плиоцена.

В Байкальской впадине теоретически благоприятными для нефтегазообразования являются все геологические и термодинамические параметры (Исаев, 2013). Большой объем газообразных и жидких УВ разгружается на дне Байкала в зоне сипов и грязевых вулканов, а также концентрируется в слоях газогидратов. Вдоль юго-восточного борта Байкальских впадин известно несколько мест высачивания нефти. Продукты её поверхностного окисления формируют на дне Байкала характерные небольшие конические битумные постройки, отдельные капли, всплывая, достигают поверхности озера. На основании результатов биомаркерных исследований нескольких образцов нефтей Байкала считается, что исходным органическим веществом для байкальской нефти должны были служить остатки высшей растительности и озерного планктона, а возраст нефтематеринских отложений не может быть древнее времени появления ангиоспермовых растений, т.е. мелового периода (Каширцев и др., 2006; Конторович и др., 2007).

Глава 2. Геохимические исследования поверхностного слоя донных отложений

Геохимические методы исследования поверхностных отложений изучают закономерности пространственной изменчивости и природы геохимических полей (Кругляков, 1974). В современных донных илах присутствуют сингенетические (современные) УВ газы и битумоиды, которые образуют фоновые геохимические поля. Кроме того, в результате перепадов давления и разницы концентраций

происходит непрерывный процесс массопереноса УВ из глубинных частей осадочного разреза, в результате которого формируются аномальные геохимические поля (газовые, битуминологические) в поверхностных отложениях (Петухов, Старобинец, 1993). Изучение легких углеводородов и углеводородов-биомаркеров из донных отложений на молекулярном уровне позволяет выявлять миграционные УВ соединения, которые предоставляют ключевую информацию о нефтяных системах: тип источника (тип органического вещества); возраст источника; уровень органической зрелости и первичные и вторичные пути миграции (Abrams et al., 2001). Использование геохимических методов исследования донных осадков на настоящее время является единственным возможным для изучения нефтегазоносности Байкальской впадины ввиду полного отсутствия здесь глубоких скважин.

Глава 3. Методика изучения фактического материала

В главе описаны методы исследования, последовательность их применения и оборудование, использованные для изучения донных отложений, образцов газов, битумов, нефтей и углей. Места донного опробования определялись на основании сейсмоакустических данных, пробоотбор осуществлялся с помощью гравитационной трубы длиной 5 м. После отбора донных илов выполнялось их литологическое описание, выделение газовой составляющей методом «Head-Space». Нефть отбиралась непосредственно из трещин и полостей в колонке донных отложений при помощи пипетки. Образцы поверхностных битумных построек района Горевой Утёс получены от О.М. Хлыстова. Состав газов изучался на газовом хроматографе и изотопном масс-спектрометре. Исследования нефти и битума проводились на хроматомасс-спектрометре. При изучении углей использовалась углепетрография, пиролиз по методу Rock-Eval, изотопная масс-спектрометрия. Эксперименты по гидропиролизу углей танхойской свиты (потенциального аналога нефтегазоматеринской толщи Байкала) проводились в автоклаве при нагреве до 350°C и давлении 300 атмосфер. «Синтетические» газы и нефти, образованные в результате лабораторного эксперимента, изучались по тем же методикам и теми же методами, которые применялись для образцов из байкальских донных отложений.

Глава 4. Результаты исследований

4.1 Молекулярные и изотопные характеристики газов донных отложений

Геохимические исследования газа, отобранного вне зон фокусированной разгрузки, позволили охарактеризовать микробиальный газ, образующийся в донных отложениях озера Байкал. Он состоит главным образом из метана, с концентрациями до 10 мл/л и легким изотопным составом углерода (таблица 1).

Газ, отобранный из зон фокусированной разгрузки, имеет высокие концентрации метана. Кроме того, были отмечены определенные закономерности в молекулярном и изотопном составе газа в зависимости от расположения структур относительно бортов Байкальской впадины (Видищева и др., 2022) (рисунок 1). В целом, вдоль северо-западного борта впадины происходит разгрузка газа с преобладанием в составе метана изотопно легкого по углероду, а вдоль юго-восточного борта высачивается газ с повышенным содержанием гомологов и изотопно тяжелым углеродом метана (таблица 1, рисунок 2).

Таблица 1. Молекулярный и изотопный составы природных газов донных отложений озера Байкал

Молекулярные и изотопные параметры	Газ с участков за пределами структур фокусированной разгрузки («фоновые» значения)	Газ из структур фокусированной разгрузки северо-западной части озера	Газ из структур фокусированной разгрузки юго-восточной части озера
Концентрация CH ₄ , мл/л	до 10	от 100	от 100
C ₁ /(C ₂ +C ₃)	13000-90000	100-11155	6-1575
δ ¹³ C - CH ₄ , ‰	-73,0*	от -81,5 до -55,4	от -66,0 до -41,0
δ ¹³ C - C ₂ H ₆ , ‰	-65,9**	от -65,9 до -19,0	от -32,0 до -22,0
δ ² H - CH ₄ , ‰	не определено	от -312,5 до -300,0	от -326 до -260
δ ¹³ C - CO ₂ , ‰	от -19,5 до -15,8	от -37,0 до 10,0	от -10,0 до 23,6

* - среднее значение изотопного состава углерода метана из образцов, отобранных автором вне зон фокусированной разгрузки;

** - минимальное зарегистрированное значение изотопного состава углерода этана (Nachikubo et al., 2020).

Для объяснения столь существенного различия в составе газов, отобранных из структур разгрузки, располагающихся вдоль северо-западного и юго-восточного бортов Байкальской впадины, был проведен комплексный анализ.

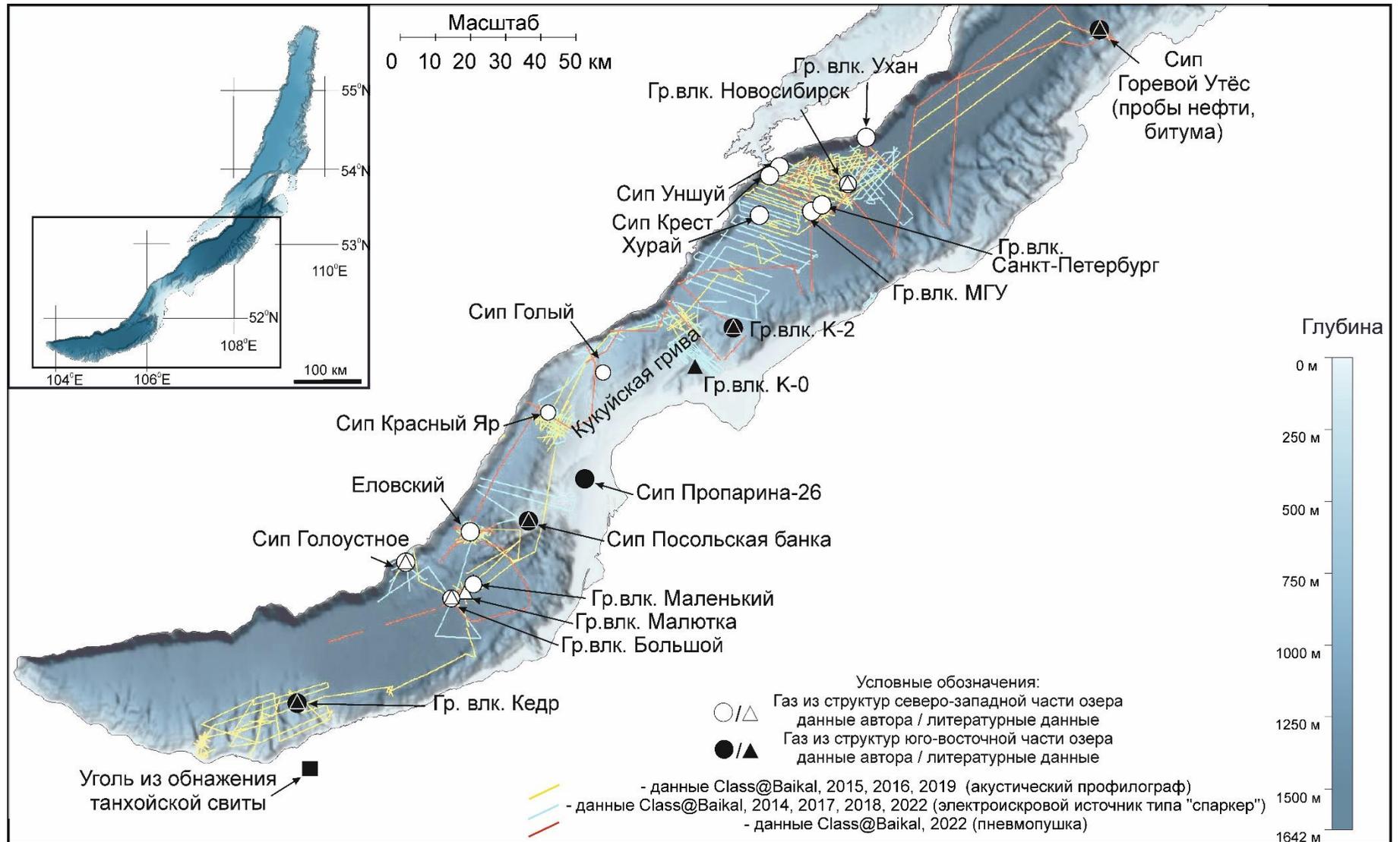


Рисунок 1. Карта района исследования с положением изученных структур. Примечание: Гр. влк. – грязевой вулкан

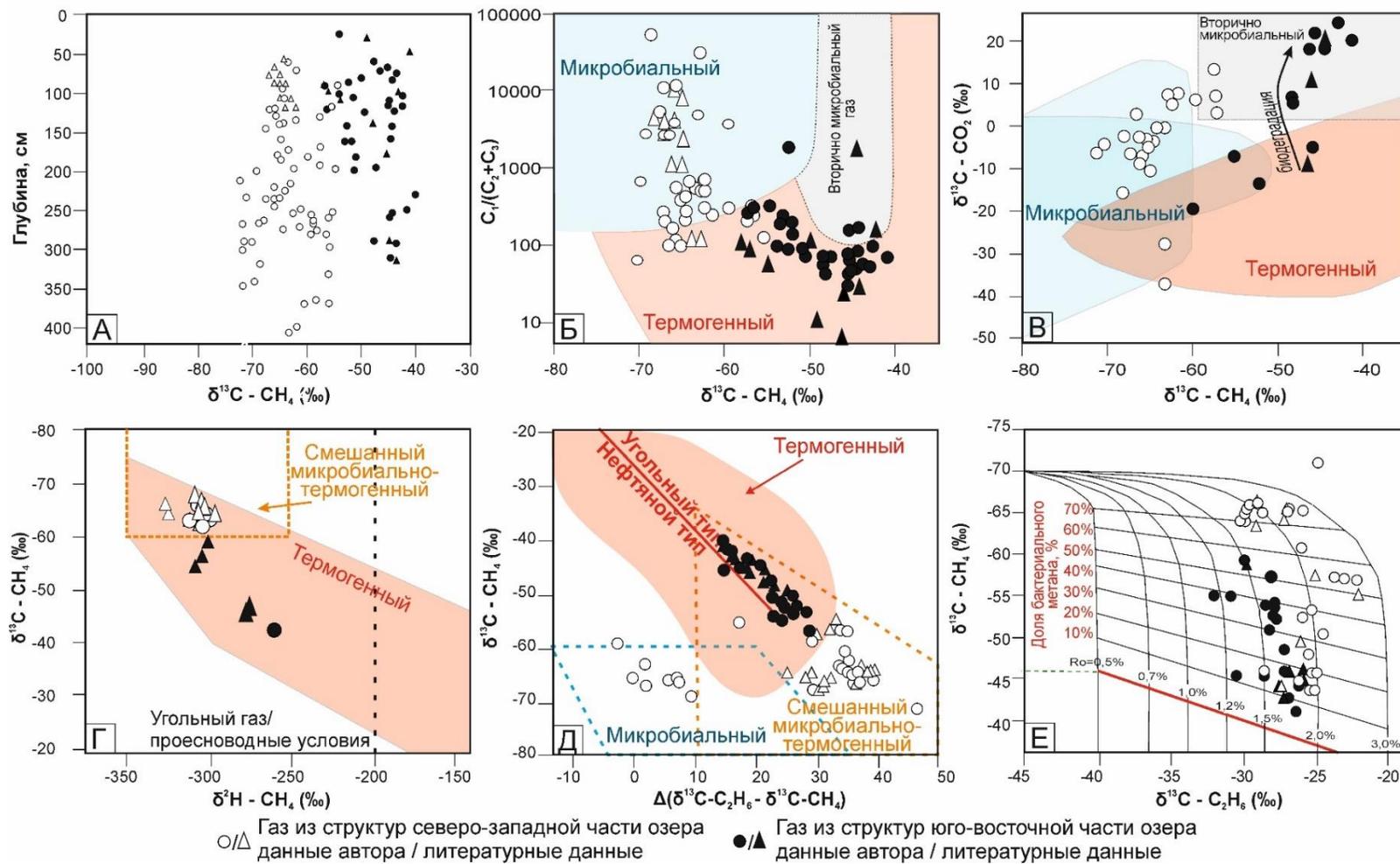


Рисунок 2. Молекулярный и изотопный составы природных газов донных отложений озера Байкал на генетических диаграммах разных авторов: А - распределение изотопного состава углерода метана с глубиной; Б - диаграмма соотношений молекулярного и изотопного состава газов (по Milkov, 2018); В - диаграмма зависимости $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ от $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ (Milkov, Etiore, 2005); Г - диаграмма зависимости $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ от $\delta^2\text{H}-\text{CH}_4$ (Milkov, Etiore, 2005); Д - диаграмма зависимости $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ от $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2\text{H}_6$ (Milkov, Etiore, 2005); Е - диаграмма зависимости $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ от $\delta^{13}\text{C}-\text{C}_2\text{H}_6$ (по Janiga, 2015 с изменениями) (литературные данные взяты из Nishikubo et al., 2010, 2020; Калмычков и др., 2017; 2019)

По результатам анализа установлено, что различия в составе газов донных отложений озера Байкал определяются тремя факторами:

- разубоживанием мигрирующего из глубины к поверхности термогенного газа приповерхностными микробиальными газами;
- молекулярным и изотопным фракционированием на путях миграции термогенных газов из глубин к поверхности;
- различной глубиной современного залегания нефтегазоматеринских пород (НГМП) и их геохимическими характеристиками.

Разубоживание термогенного газа приповерхностными микробиальными газами. В донных осадках озера Байкал происходит активная деятельность метаногенов в анаэробных микроразонах верхних слоев осадков (Дагурова и др., 2004). При этом, в процессе миграции, термогенный газ смешивается у поверхности дна с микробиальным, и за счет масс-балансного эффекта термогенный сигнал газов нарушается в сторону облегчения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$. Используя уравнение масс-балансового соотношения (Zeebe, 2001), было рассчитано, что вклад термогенного газа в результирующую флюидную смесь, разгружающуюся на дне Байкала в пределах структур юго-восточного борта озера, в среднем составляет 78%, тогда как на северо-западном борту термогенный газ присутствует в количестве не более 25%. Было установлено, что фактор «микробиального разубоживания» сказывается, главным образом, на изотопных характеристиках разгружающегося метана и практически не влияет на геохимические параметры его гомологов. Для понимания природы термогенной составляющей газов донных осадков использовались результаты исследований тяжелых углеводородов.

Молекулярное и изотопное фракционирование на путях миграции углеводородных газов к поверхности. Масштабы фракционирования зависят от расстояний, характеристик путей и способов (диффузия и фильтрация) миграции от источников газа до поверхности. На примере изучения газов, разгружающихся в районах вдоль крупного разлома Гидратный (центральная котловина Байкала) было показано, что структурно-тектоническая позиция и особенности строения верхней части осадочного разреза определяют основные механизмы миграции флюидов из глубин к поверхности дна, что, в свою очередь, прямым образом отражается в их молекулярном и изотопном составе (Видищева и др., 2021).

Северо-западная часть озера характеризуется мощной осадочной толщей и единичными разломами. Преобладающий тип миграции газа здесь – диффузия. Метан имеет относительно малую молекулярную массу и большой коэффициент диффузии, что приводит к его распространению и накоплению в конце путей миграции с формированием преобладания метана в придонных отложениях. Этот процесс также сопровождается фракционированием изотопов углерода метана, создавая отрицательный сдвиг по величине $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ газа. Юго-восточная часть озера характеризуется менее мощным осадочным чехлом (3-4 км) и более многочисленными разломами, которые служат каналами миграции. Газы мигрируют преимущественно путем фильтрации, при этом претерпевают меньшие изменения (рисунок 2А, Б). Кроме того, на участках с аномально активной современной разгрузкой газа, в т.ч. и в северо-западной части озера, молекулярное и изотопное фракционирование флюидов на путях миграции менее значительно за счет превалирующей фильтрации, которая и обеспечивает аномально большой дебит.

Неоднородная зрелость нефте-газоматеринской толщи. Природный газ в осадочных бассейнах образуется за счет преобразования сапропелевого и гумусового органического вещества (ОВ). Два геохимически разных типа природного газа - нефтяной и угольный – выделяются, соответственно. От нефтяного угольный отличается более тяжелым изотопным составом углерода и водорода УВ газов и более высоким коэффициентом сухости (Galimov, 1988; Clayton, 1991; Dai, 1992; Milkov, 2021). Изотопный состав и коэффициент сухости углеводородных газов также характеризуют степень зрелости ОВ НГМТ. Чем более высоко преобразовано ОВ, тем более сухой и изотопно тяжелый газ оно образует в зоне нефтегазогенерации (Galimov, 1988; Galimov, 2006).

Используя новую диаграмму А. Милкова изотопных соотношений метана и этана (Milkov, 2021), было определено, что термогенный газ, разгружающийся в юго-восточной части озера, относится к угольному типу, образованному главным образом из гумусового ОВ (рисунок 2Д). Тип газа, отобранного из структур северо-западной части, определить однозначно, только используя изотопные соотношения углерода метана и этана, не представляется возможным ввиду высокой доли микробияльного метана в его составе (рисунок 2Д). Поскольку этан преимущественно термокаталитический, его изотопный состав, в отличие от

изотопного состава метана, не меняется за счет смешения с микробиальными поверхностными газами и, соответственно, отражает характеристики НГМТ. Проанализированный этан из образцов газов северо-западной части Байкала характеризуется более изотопно тяжелым углеродом, чем этан газов юго-восточной части (рисунок 2Е). Это свидетельствует о том, что газы, разгружающиеся вдоль северо-западной части Байкала, образовались из гумусового ОВ более преобразованного, чем в юго-восточной части озера.

Сухой газ характерен для структур разгрузки северо-западной части Байкала. В общем и целом, как обсуждалось выше, это следствие молекулярного фракционирования на путях миграции и преобладания микробиального метана в газовой компоненте донных отложений. Однако, тот факт, что у северо-западного борта впадины сухой газ преобладает в том числе и в зонах с аномально активной разгрузкой (где влияние фракционирования и бактериального метаногенеза на состав флюидов не является определяющим) позволяет связать сухость УВ с высокой зрелостью производящей НГМТ. Тогда, в противоположность этому, более жирные газы, разгружающиеся в юго-восточной части Байкала, отражают меньшую преобразованность распространенной здесь газогенерирующей толщи.

Таким образом, различие в типе и составе газов зон фокусированной разгрузки в разных частях озера, в настоящий момент, связано с разной степенью зрелости гумусового ОВ газоматеринской толщи.

4.2. Результаты исследований пробы нефти и битума

Чтобы охарактеризовать исходное ОВ НГМТ были изучены пробы нефти из донных отложений и битума из поверхностных битумных построек, отобранные в юго-восточной части озера, в районе структуры нефте- и газоразгрузки Горевой утес. Геохимическое изучение группового состава пробы битума и нефтей показало их генетическую связь. Изотопный состав фракций битума $\delta^{13}\text{C}$ варьирует от - 27,16 ‰ до - 25,6 ‰, а изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ фракций нефти от -28,0 ‰ до -26,0 ‰. Тяжелый изотопный состав углерода жидких углеводородов свидетельствует о континентальном происхождении ОВ НГМТ (Конторович, 1986; Chung et al., 1992; Peters et al., 2005; Galimov, 2006).

Масс-фрагментограмма $m/z = 85$ показывает бимодальное распределение нормальных алканов от C13 до C39, с преобладанием высокомолекулярных

гомологов. Высокая концентрация C25-C31 и преобладание в них нечетных алканов характерны для смешанного органического вещества, преимущественно континентального происхождения, исходного для флюидов, разгружающихся вдоль ЮВ борта озера. Обнаруженные в пробах нефти и битума такие соединения, как дриманы, гомодриманы, секогопаны определяют уникальность байкальской нефти, и также подтверждают весомый вклад остатков высшей растительности в формирование исходного ОВ.

4.3 Изучение процессов генерации углеводородов из нефтегазоматеринских пород

Исследования разгружающихся со дна озера Байкал газообразных и жидких УВ позволили установить преобладающую роль гумусового ОВ в составе НГМТ. Это согласуется с представлениями о том, что в олигоцен-миоценовое время происходило медленное прогибание ложа палео-Байкала (Мац, 2012), и при этом были благоприятные условия для накопления углистых отложений. Стратиграфическим аналогом данных углистых отложений может являться танхойская свита. Выходы танхойской свиты закартированы на южном берегу озера Байкал (Мащук и Акулов, 2012). Породы танхойской свиты вскрыты скважинами в Баргузинской и Тункинской впадинах (Rasskazov et al., 2014) и, вероятно, протягиваются на значительную часть современного рифта Байкала (Хлыстов и др., 2021).

Согласно структурному положению (Хатчинсон и др., 1993) и данным о тепловом потоке (Гольмшток, 1997; Poort, Klerkx, 2004) было определено, что в юго-восточной части впадины главная зона нефтеобразования (ГЗН) начинается уже на глубине 700-900 м под дном озера. Присутствие большого количества разрывных нарушений будет способствовать активному теплопереносу и дополнительному прогреву ОВ осадочной толщи. В северо-западной части впадины, которая характеризуется мощной осадочной толщей (до 7,5 км) и меньшими значениями теплового потока, ГЗН предполагается в интервале 1350-5300 м. Тогда нижняя часть осадочного разреза, где должна быть распространена угленосная толща, будет находиться уже в «подошве» нефтяного окна - главной зоне газогенерации.

Поскольку глубоких скважин в районе озера Байкал нет, для изучения потенциала предполагаемой углистой НГМТ могут быть использованы выходы

углей в осадочном обрамлении Байкала олигоцен-плиоценового возраста. Изучены два образца углей из разреза танхойской свиты на юго-восточном побережье озера Байкал.

Результаты пиролитических исследований показали, что образец угля №1 имеет высокие значения параметра S2 и водородного индекса (HI) и более генерационно способный, чем образец угля №2 (Таблица 2).

Таблица 2. Значения пиролитических параметров, характеризующие нефтегазоматеринские свойства пород

Образец	S1, мг УВ/ г породы	S2, мг УВ/ г породы	Сорг, % масс.	HI, мг УВ/ г Сорг	OI, мг CO ₂ / г Сорг
Уголь №1	0,8	88,04	56,68	155	39
Уголь №2	0,5	30,98	61,13	50	40

Определение мацерального состава углей показало, что их основным компонентом является витринит (85-98%) (Таблица 3). При этом в образце угля №1, который характеризовался лучшими генерационными свойствами, содержится 14% липтинитовой составляющей, которая относится к сапропелевому ОВ и может генерировать нефть (Лопатин Н.В., Емец Т.П. 1987; Tissot V.P. and Welte D., 1984; Thompson S. et al., 1985; Liu S.L. and Taylor G.H., 1991).

Таблица 3. Результаты углетрографических исследований образцов углей танхойской свиты, включающие мацеральный состав и значение показателя отражения витринита

Образец	Витринит, %	Липтинит, %	Инертинит, %	RV, %
Уголь №1	85	14	1	0,34
Уголь №2	98	2	-	0,34

Чтобы проверить экспериментально, могут ли углистые отложения, которые традиционно считаются газогенерирующими, на данной территории являться источником не только газов, но и байкальской нефти, был проведен лабораторный эксперимент по моделированию созревания ОВ в автоклаве. В результате эксперимента из образцов углей были получены как газообразные, так и жидкие «синтетические» УВ. При этом количество «синтетической» нефти составило 115 мг УВ/г породы для образца №1 и 41 мгУВ/г породы для образца №2. Проведено сравнение изотопных кривых «синтетически» полученных газов и природных газов из донных осадков озера Байкал, которое показало, что газы Байкала могли

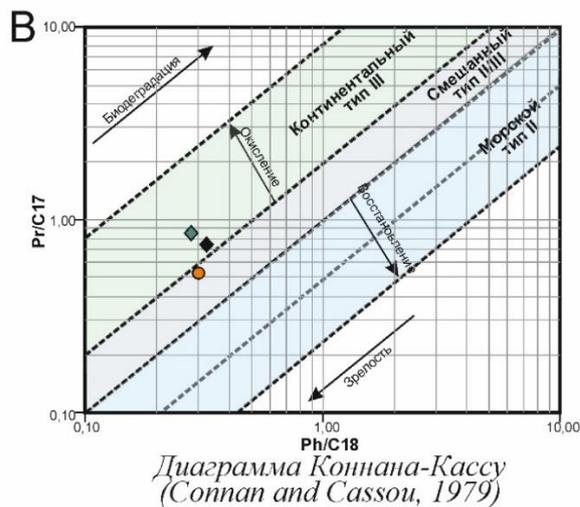
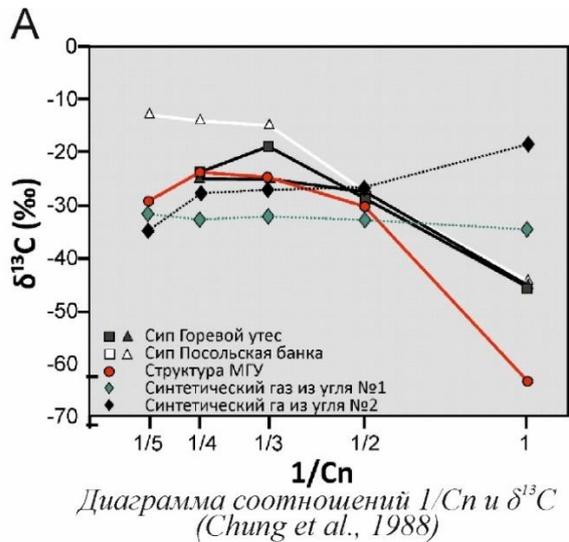


Рисунок 3. Сравнение геохимических параметров «синтетических» газов и нефтей с УВ флюидами озера Байкал

образоваться из угленосных отложений, аналогичных породам танхойской свиты. Среднее значение изотопного состава углерода этана в образцах природного газа составляет $-28,5\%$, а для «синтетического» газа $-30,7\%$ (рисунок 3А).

В «синтетической» нефти распределение регулярных стеранов C_{27} , C_{28} и C_{29} аналогично образцам нефти, отобраным из донных отложений района структуры Горевой Утес (рисунок 3Б). Отношения C_{22t}/C_{21t} и C_{24t}/C_{23t} для «синтетической» нефти из углей и образцов байкальской нефти изменяются от 0,6 до 0,8. Отношение C_{26t}/C_{25t} для образцов как «синтетической» нефти, так и нефти из донных отложений, больше 2.

Согласно полученным значениям соотношений $Pr/n-C_{17}$ и $Ph/n-C_{18}$, исходное ОВ нефти, разгружающейся на дне Байкала в районе структуры Горевой утес, похоже на исходное ОВ «синтетических» нефтей, т.е. на угли танхойской свиты (рисунок 3В).

Таким образом, результаты лабораторного моделирования показали: (1) принципиальную возможность углей танхойской свиты генерировать жидкие УВ; (2) схожесть молекулярных и изотопных характеристик газов и нефтей,

«синтетически» полученных из углей танхойской свиты, с характеристиками УВ флюидов, разгружающихся на дне озера Байкал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты обширного комплекса газогеохимических исследований донных отложений озера Байкал, а также анализа нефтей и битума и результаты изучения образцов углей танхойской свиты.

(1) Выявлены существенные различия в молекулярном и изотопном составе углеводородных газов зон фокусированной разгрузки, приуроченных к северо-западному и юго-восточному бортам байкальской впадины.

(2) Установлены факторы, определяющие такие различия и отражающие рифтовую природу и асимметричное внутреннее строение Байкальской впадины.

(3) Определена изменчивость катагенетической зрелости ОВ потенциальной НГМТ, которая на северо-западном борту Байкальской впадины более преобразована, чем на юго-восточном борту.

(4) Выяснено, что потенциальной нефтегазоматеринской толщей могли являться углистые отложения, способные генерировать как жидкие, так и газообразные УВ флюиды.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.11:

Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Соловьева М.А., Ефремов В.Н., **Видищева О.Н.**, Маццини А., Кудаев А.А., Буланова И.А., Барымова А.А., Гордеев Е.К., Деленгов М.Т., Егошина Е.Д., Сорокоумова Я.В., Понимаскин П.О. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз.Байкал // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2018. № 5. С. 111–116. (авторский вклад – 30%) Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2018: 0,250.

Видищева О. Н., Ахманов Г. Г., Соловьева М.А. Маццини А., Хлыстов О.М., Егошина Е.Д., Кудаев А.А., Корост Д.В., Полудеткина Е.Н., Морозов Н.В., Григорьев К.А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал) //Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. – 2021. – №. 3. – С. 3-16. (авторский вклад – 80%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2020: 0,285.

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. Различия в молекулярном и изотопном составе газов зон фокусированной разгрузки, расположенных в северо-западной и юго-восточной частях озера Байкал // Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 209-216. (авторский вклад – 80%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2022: 0,451.

Иные научные публикации:

Vidishcheva, O.N., Akhmanov, G.G., Solovyeva, M.A., Egoshina, E.D., Vasilevskaya, Y.A., Delengov, M.T., Khlystov, O.M. Tectonic control of modern fluid discharge at the bottom of Lake Baikal: the Class@ Baikal Project data report // Limnology and Freshwater Biology. 2020. № 4. P. 952-953. (авторский вклад – 80%). Импакт-фактор журнала в РИНЦ, 2020: 0,759.

Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Хлыстов О.М. Углеводороды Байкальского рифта: особенности миграции и флюидопроявления в донных отложениях // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022» Том IV (IV): 2022. том 4, тезисы, с. 35-36.

Vidishcheva O., Delengov M., Fadeeva N., Poludetkina E., Bakay E., Akhmanov G., Mazzini A., Morozov N., Khlystov O. Oil and Gas Potential Source of the Lake Baikal Sediments: Gas-Geochemical and Biomarker Study // 30th International Meeting on Organic Geochemistry (IMOG 2021), Sep 2021, Volume 2021, p.1 – 2.

Vidischeva O., Solovyeva M., Egoshina E., Vasilevskaya Y., Poludetkina E., Akhmanov G., Khlystov O., and Mazzini A. Integrated analysis of geophysical and geochemical data from cold fluid seepage system along the Gydratny Fault (Lake Baikal) // EGU General Assembly Conference Abstracts (EGU 2020). doi:10.5194/egusphere-egu2020-20934.