

Геохимические характеристики органического вещества донных отложений северной части Баренцева моря как индикатор миграции углеводородов из недр

Л.Ю. Сигачева*, О.Н. Видищева, А.Г. Калмыков, Е.Н. Полудеткина, Г.Г. Ахманов
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Проведено исследование группового и молекулярного составов органического вещества донных осадков северного сектора Баренцева моря. Выявлены районы, где углеводородный молекулярный состав органического вещества донных отложений имеет сходство с нефтяным. Термически зрелые углеводородные соединения в отложениях области исследований, скорее всего, имеют миграционную природу, что может свидетельствовать о наличии процессов флюидоразгрузки из глубоководных частей осадочного разреза. На основании сравнительного анализа молекулярного состава углеводородных соединений донных отложений и из пород ближайшего к району исследований берегового обрамления выдвинуто предположение о том, что источником миграционного органического вещества в современных осадках являются глубоководные среднетриасовые глинистые отложения.

Ключевые слова: Арктический шельф, Баренцево море, донные осадки, органическое вещество, флюидоразгрузка, углеводороды-биомаркеры

Для цитирования: Сигачева Л.Ю., Видищева О.Н., Калмыков А.Г., Полудеткина Е.Н., Ахманов Г.Г. (2023). Геохимические характеристики органического вещества донных отложений северной части Баренцева моря как индикатор миграции углеводородов из недр. *Георесурсы*, 25(4), с. 42–57. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.3>

Введение

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Об энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года», расширение геологоразведочных и поисковых работ по освоению нефтегазового потенциала арктических осадочных бассейнов представляет собой одну из ключевых задач. Начальные ресурсы нефти и газа российского шельфа крайне велики и оцениваются в 113,9 млрд т нефтяного эквивалента (Мельников и др., 2020). На долю Баренцевоморского континентального шельфа, включая Печорское море, приходится 38,5% от суммарных ресурсов углеводородов (УВ) (Мельников и др., 2020). Однако степень изученности и освоенности данных ресурсов в акватории не превышает 20%. В южной и центральной частях Баренцевоморского шельфа открыты 11 месторождений углеводородов, крупнейшим из которых является Штокмановское. Извлекаемые запасы газа этого месторождения оценены в 3,9 трлн м³, а конденсата – в 56,1 млн т (Сенин и др., 2020). Вместе с тем, северная часть моря не охарактеризована бурением. На основании региональных сейсмических исследований в ее пределах локализован ряд перспективных структур (Казанин и др., 2016). В ходе исследований верхней части осадочного разреза и водной толщи как норвежского, так и российского секторов Баренцева моря, выявлены

различные геолого-геофизические признаки современной и палео- флюидоразгрузки на дне моря, в т.ч. газовые «факелы», акустические аномалии типа «яркое пятно», «газовые трубы», донные воронки типа «rockmark», «кратеры гидратного взрыва» (blow-out craters), гляцио-тектонические пары (hill-hole pairs) (Соловьева и др., 2020; Chand et al., 2008; Rise et al., 2015; Winsborrow et al., 2016; Andreassen et al., 2017; Dowdeswell et al., 2021; Montelli et al., 2023), а также биологические индикаторы, представленные метан-потребляющими организмами в донных осадках (Niemann et al., 2006; Smirnov, 2014). Помимо этого, о миграции флюидов из осадочного чехла в приповерхностную часть разреза свидетельствуют текстуры дегазации донных осадков, отмечаемые для некоторых образцов, отобранных в морских экспедициях (Соловьева и др., 2020). Недавно в западной части Баренцева моря был обнаружен грязевой вулкан, получивший имя Бореалис (Bludd, 2023), а грязевые вулканы традиционно рассматриваются как прямые индикаторы нефтегазоносности осадочных бассейнов.

Изучение нефтегазоносности требует систематизации данных и расширения работ, нацеленных на получение сведений о процессах, связанных с функционированием УВ систем. Это особенно актуально при оценке нефтегазоносности северных, менее изученных, секторов Баренцева моря.

Методы геохимических исследований поверхностных отложений являются эффективным способом прямой оценки УВ систем осадочного бассейна без проведения глубокого бурения. С их помощью проводится изучение обнаруженных зон подтока УВ флюидов из глубоководных залежей к поверхности морского дна. В основе

* Ответственный автор: Любовь Юрьевна Сигачева
e-mail: sigacheva_l@list.ru

© 2023 Коллектив авторов

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

данных методов лежат представления о наличии непрерывного диффузионно-фильтрационного массопереноса УВ флюидов из скоплений в поверхностную часть осадочного разреза. Движение УВ к поверхности посредством фильтрации (микрофильтрации) происходит по зонам разуплотнений и микротрещиноватости (Петухов, 1981). Жидкие УВ флюиды мигрируют как в виде самостоятельной непрерывной фазы, так и в газорастворенном состоянии. Кроме того, их миграция может осуществляться в виде капель, глобуль, пленок на поверхности воды и газа (Бурштар, 1973; Чахмахчев, 1983). Процессы диффузии – перемещения УВ на молекулярном уровне – также играют существенную роль при массопереносе (Коржов, Головкин, 1994). В акваториях граница раздела «вода – осадок» представляет собой важный барьер на пути миграции УВ соединений (Петухов, Старобинец, 1993). Поэтому объектом исследования поверхностных геохимических поисковых методов являются, как правило, УВ флюиды донных осадков. При проведении таких исследований учитывается, что в придонном слое отложений также широко распространено «собственное» (сингенетичное) органическое вещество (ОВ). При этом формируются фоновые концентрации УВ, которые зависят от характеристик исходного ОВ, условий его накопления и трансформации в приповерхностных слоях. Процессы миграции УВ с глубин находят своё отражение в проявлении термогенных УВ соединений на общем фоне геохимических параметров, характерном для сингенетичного незрелого ОВ.

Опубликованные исследования УВ соединений из донных осадков северной части Баренцева моря подтверждают высокий нефтегазовый потенциал района исследований (Егошина и др., 2020; Немировская и др., 2021; Blumenberg et al., 2016; Vidischeva et al., 2022; и др.).

В статье приводятся результаты изучения сингенетичных и миграционных УВ в донных осадках

района исследований, расположенного в северной части Баренцева моря, а также определения возможного источника миграции в осадочном чехле путем сравнения полученных данных с результатами изучения ближайшего берегового обрамления.

Геологическое строение района исследований

Район исследований расположен между архипелагами Земля Франца Иосифа, Шпицберген и Новая Земля (рис. 1). Баренцево море традиционно рассматривается в составе Баренцевской окраинно-материковой (шельфовой) плиты (Баренцевская шельфовая плита, 1988). Согласно концепции тектонического районирования, предложенной А.В. Ступаковой (Ступакова, 2011), район исследований расположен на сочленении Северо-Баренцевской сверхглубокой депрессии и Северо-Баренцевской зоны поднятий – структур первого порядка.

Геологический разрез северной части Баренцевоморского шельфа слагают породы архей-протерозойского, палеозойского и мезозойского возрастов. Кайнозойские отложения отсутствуют вследствие кайнозойского воздымания и эрозии (Henriksen et al., 2011). В северо-западной части района исследований за счет эрозионного срезания на поверхность выходят породы поздне триасового, юрского и мелового возрастов. Согласно (Старцева и др., 2017), осадочный разрез здесь начинается с отложений низов франского яруса и достигает мощности 15–18 км в наиболее погруженных частях Северо-Баренцевской впадины. Палеозойские отложения имеют преимущественно карбонатный состав, а с позднепермского времени в районе установилось, главным образом, терригенное осадконакопление (Старцева и др., 2017).

В разрезе осадочного чехла выделяют четыре нефтегазоносных комплекса: верхнепалеозойский, триасовый,

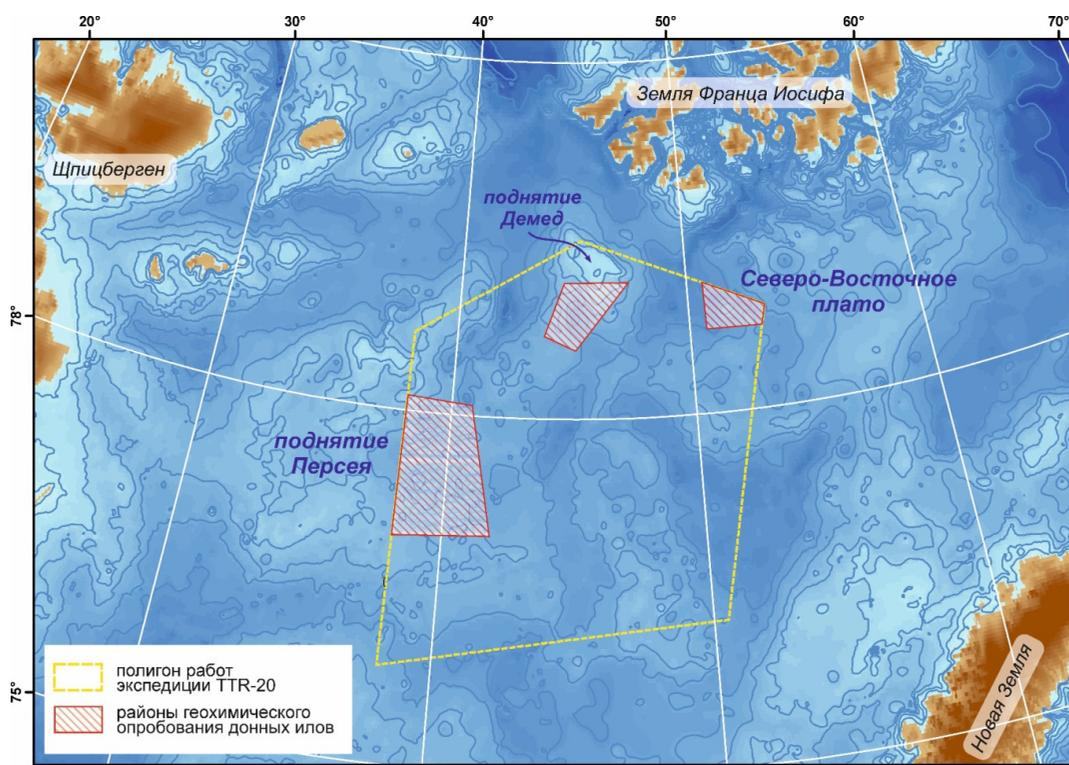


Рис. 1. Расположение районов геохимических исследований экспедиции TTR-20

юрский и меловой (Галимов и др., 2008). Основными источниками УВ служат глинистые прослои в триасовых и юрских отложениях. Среди триасовых отложений наилучшими генерационными свойствами обладают нижне- и среднетриасовые глинистые прослои с гумусово-сапропелевым типом ОВ, а также прослои углистых верхнетриасовых пород (Кирюхина и др., 2012). В юрских отложениях наибольшим генерационным потенциалом обладают верхнеюрские «черные глины», обогащенные сапропелевым ОВ (Кирюхина, 2013). Основными продуктивными отложениями являются верхнепермские и триасовые песчаники, а также нижне-среднеюрские аллювиальные и прибрежно-морские песчаники (Норина, 2014).

Материалы и методы

В основу работы положен материал, собранный в северной части Баренцева моря в ходе геолого-геофизической экспедиции TTR-20 по программе «Обучение-через-исследование (Training-through-Research)», организованной геологическим факультетом Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова осенью 2021 года при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации. Коллекция изученных проб включала 140 образцов донных отложений, отобранных на 31 станции донного пробоотбора.

Места отбора проб донных илов были определены на основе результатов дистанционного изучения верхней части осадочного разреза, которые позволяли ожидать проявления процессов миграции УВ к поверхности. Опробовались, например, донные воронки типа «rock-mark», дно над сейсмоакустическими аномалиями типа «яркое пятно», разломами и пр. Также выполнено несколько станций пробоотбора в местах без признаков флюидоразгрузки, где ожидалось фоновые концентрации и состав УВ. Все выполненные станции пробоотбора характеризуют три района в пределах полигона исследований (с запада на восток): восточный склон и подножье поднятия Персея (далее по тексту – поднятие Персея); южный склон и подножье поднятия Демед (далее по тексту – поднятие Демед); и западное подножье Северо-Восточного плато (далее по тексту – Северо-Восточное плато) (рис. 1). В качестве пробоотборника использовалась ударная гравитационная труба длиной 3 м. Пробы для исследования ОВ, объемом 200–250 мл ила природной консистенции, отбирались вдоль всего полученного керна с шагом около 20 см. Высушивание образцов производилось на судне в вытяжных шкафах.

Лабораторные геохимические исследования выполнялись поэтапно и включали следующие виды анализов: люминесцентно-битуинологический анализ (ЛБА), пиролиз, экстракцию, анализ группового состава экстрактов и хромато-масс-спектрометрический анализ (ХМС) насыщенной и ароматической фракций экстрактов.

Валовый ЛБА выполнялся по методике В.Н. Флоровской (Флоровская, 1957). В качестве растворителя использовался хлороформ.

Пиролитические исследования осадков выполнялись по методу Rock-Eval-6. В процессе нагрева до 300 °С регистрировались свободные УВ (пик S_1 – мг УВ/г навески); в интервале 300–650 °С – УВ, выделившиеся в процессе

термической деструкции ОВ (пик S_2 – мг УВ/г навески). Также в работе использовались расчётные параметры ТОС (содержание общего органического углерода) и MINC (содержание минерального углерода). Для отдельных образцов были проведены пиролитические исследования по модифицированной программе «Reservoir», согласно методике, описанной в работе (Гершелис и др., 2020).

Горячая экстракция раздробленных до порошкообразного состояния, предварительно высушенных образцов донных отложений проводилась в аппаратах Сокслета хлороформом. При необходимости полученные экстракты очищались от серы с помощью порошка активированной меди. Групповой состав экстрактов определялся SARA-анализом согласно стандарту ASTM D4124 (разделение флюида на насыщенную, ароматическую фракции, смолы и асфальтены). В рамках данного стандарта из полученного экстракта с помощью гексана (40:1 по объему) в течение суток отделяются асфальтены. Полученные мальтены разделяли методом колоночной жидкостно-адсорбционной хроматографии на активированном силикагеле.

ХМС выполнялся на газовом хроматографе Agilent 8890, соединенном с масс-селективным детектором 5977B с высокоэффективным источником ионизации Inert plus. Газ-носитель – гелий, скорость потока – 1 см³/мин, объем вводимой пробы – 1 мм³. Капиллярная колонка 60 м x 0,25 мкм x 0,25 мкм (HP-5ms). Искомые соединения идентифицировались в программном обеспечении Agilent MassHunter.

Результаты и обсуждение

Вскрытый опробованием разрез представлен отложениями верхнеплейстоцен-голоценового возраста. На основании макроописания, а также сравнения полученных данных с опубликованными материалами (Polyak, Solheim, 1993; Murdmaa et al., 2006) были выделены литостратиграфические комплексы различного генезиса: *голоценовые морские осадки* – неуплотненные глинистые и алевро-глинистые илы с прослоями и примазками гидротроилита и небольшим количеством погонифора, иногда с включениями гальки и гравия айсбергового разноса; *верхнеплейстоценовые ледниково-морские отложения* времени общей дегляциации региона, представленные слабо уплотненными алевро-глинистыми осадками с многочисленными «окатышами» более уплотненных глин и редкими включениями гравия; *плейстоценовые моренные отложения* – существенно уплотненные, сухие глинистые и алевро-глинистые отложения с включениями гальки и гравия плотных пород. Нижний, моренный комплекс был вскрыт трубками лишь на нескольких станциях пробоотбора.

По результатам валового ЛБА установлено, что содержание хлороформенных битумоидов (ХБА) в изученных образцах варьирует от 0,00016 до 0,32%. Большая часть образцов характеризуется концентрациями 0,0006–0,01% (рис. 2А). Концентрации ХБА до 0,01%, включительно, приняты за фоновые для донных отложений района исследований, а более высокие концентрации отнесены к высоким, аномальным. Повышенными концентрациями (0,01–0,32%) характеризовались лишь 19 образцов, отобранных на 13 станциях, которые относительно равномерно представляют весь район проведенных исследований.

В основном, в ХБА наблюдалось преобладание смолисто-маслянистой составляющей с подчиненными концентрациями легких УВ. Однако для некоторых образцов было свойственно повышенное содержание легких битумоидов. В данную группу попали образцы из 11 станций с аномальными концентрациями ХБА и, дополнительно, пробы с фоновыми концентрациями ХБА, отобранные на 7 станциях. Разрезы с повышенным содержанием легких битумоидов вскрыты по всему району исследований.

Параллельно с проведением ЛБА выполнены пиролизные исследования для образцов, отобранных на 11 станциях пробоотбора. По результатам пиролизных

исследований донные осадки района исследований характеризуются концентрациями ТОС 0,56–3,19%, среднее – 1,4%. Для большинства образцов диапазон значений составляет 1–2%. Максимальные концентрации наблюдались в образцах, отобранных на 2 станциях в пределах поднятия Персея и 1 станции, расположенной на Северо-Восточном плато (рис. 3А). Закономерность вариации ТОС вдоль разрезов разных станций не устанавливается, также ТОС не зависит от литологического состава отложений. Значения MinC существенно меньше, чем ТОС (от 0,03 до 0,46% при среднем 0,16%), что является

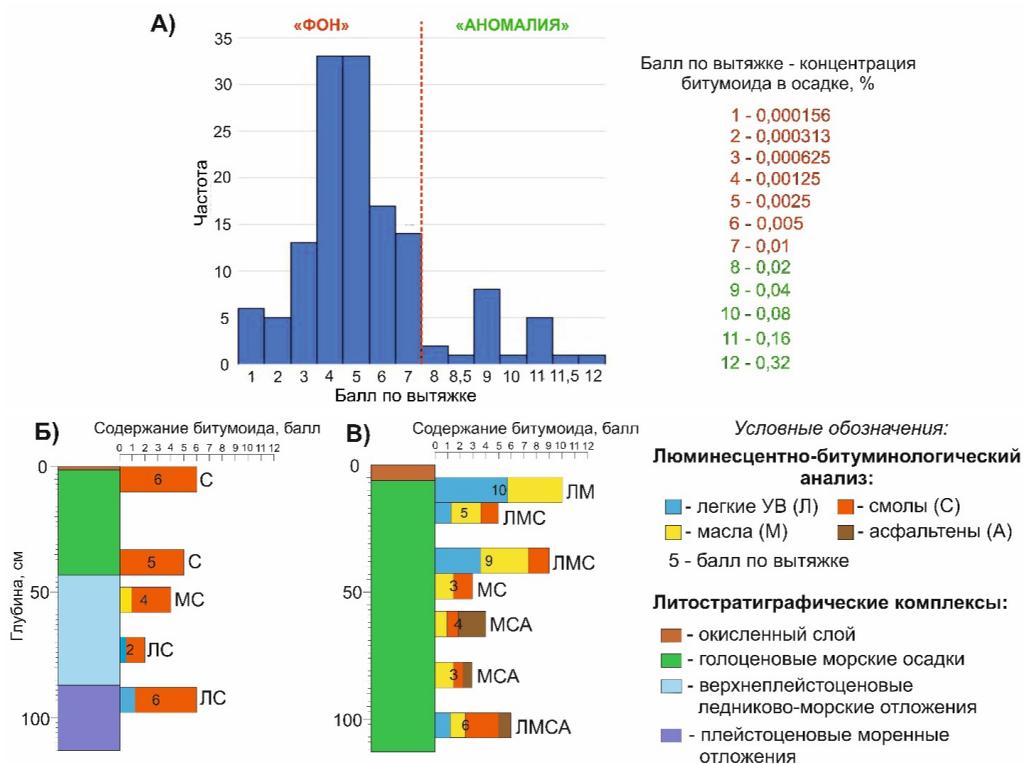


Рис. 2. Результаты люминесцентно-битуминологического анализа донных осадков: А) гистограмма распределения баллов вытяжек образцов; Б) пример фоновой станции (поднятие Демед) с низкими концентрациями битумоидов асфальтеново-маслянисто-смолистого состава; В) пример аномальной станции (поднятие Персея) с повышенными концентрациями битумоидов с легкими компонентами в составе

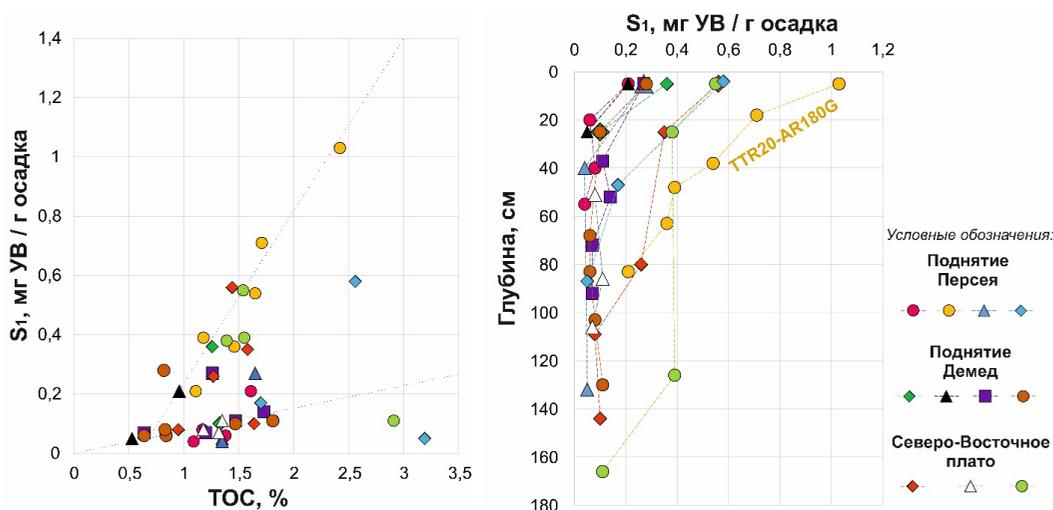


Рис. 3. Пиролизные характеристики донных осадков: А) зависимость значений пика S₁ от содержания ТОС; Б) профили вертикального распределения параметра S₁ в образцах, отобранных вдоль разрезов станций. Образцы, отобранные вдоль разреза одной станции, отмечены одним цветом и собственным значком

типичным для осадков Баренцева моря и объясняется их преимущественно терригенным составом.

УВ-насыщение осадков (S_1) варьирует в диапазоне от 0,04 до 1,03 мг УВ/г осадка, при этом содержание низкомолекулярных УВ соединений крайне мало (значения S_{1r} менее 0,04 мг УВ/г осадка). Во всех станциях наблюдается тренд уменьшения S_1 вниз по разрезу (рис. 3Б). Наиболее отчетливо данная зависимость видна в отложениях, опробованных на станции TTR20-AR180G (поднятие Персея). Максимальные значения пика S_1 , характерные для верхнего интервала (0–10 см) всех проанализированных разрезов, могут объясняться как подтоком эпигенетических УВ, так и низкой степенью диагенетической преобразованности сингенетического ОВ поверхностного слоя осадков в связи с наличием лабильных соединений биополимеров (Гершелли и др., 2020; Меленевский и др., 2011).

На графике зависимости S_1 от ТОС можно условно выделить два тренда (рис. 3А). Первый формирует группа образцов, в которой на фоне увеличения концентраций ТОС наблюдается лишь незначительное увеличение параметра S_1 . Вторая группа образцов составляет тренд, где характерно резкое увеличение значений S_1 с ростом ТОС. Как правило, ко второй группе относятся образцы из самого верхнего интервала разреза (0–10 см), в котором зафиксированы максимальные по разрезу значения параметра S_1 . Конечно, разные тренды на графике зависимости ТОС/ S_1 могут быть обусловлены разными типами сингенетического ОВ в отложениях. Тем не менее, с учетом того, что все изученные станции располагаются в одном секторе открытого моря, серьезные вариации в составе современного ОВ трудно объяснить. Более вероятным представляется, что высокие значения S_1 могут быть связаны с подтоком эпигенетических УВ соединений.

Значения пика S_2 , за который в морских осадках «отвечают» устойчивые соединения биополимеров, а также незрелые геомакромолекулы (протокероген) (Меленевский и др., 2011) в исследованных образцах варьируют от 0,53 до 4,35 мг УВ/г осадка.

По совокупным результатам ЛБА и пиролитических исследований в качестве аномальных выделены 10 станций: восемь из отобранных на поднятии Персея и по одной с поднятия Демед и Северо-Восточного плато. Дальнейшие аналитические исследования были сфокусированы на образцах отложений аномальных станций, в которых ожидалось наличие миграционных УВ. Также в каждом районе для сравнения были выбраны образцы из фоновых станций, признаков флюидоразгрузки в которых не обнаружено. В общей сложности выделение битумоидов и определение их группового состава выполнено для 72 образцов из 18 станций.

Результаты выполненной экстракции в целом хорошо согласуются с результатами пиролитического анализа. Наблюдается тренд уменьшения относительной массы растворимой в органических растворителях (гексан, хлороформ, спирто-бензол и их аналоги) части ОВ осадков в пробах с глубиной по разрезу (рис. 4). Значение данного параметра варьирует в широком диапазоне – от 0,14 до 1,97 мг УВ/г осадка. Максимальные его значения, в целом, характерны для образцов из приповерхностного интервала станций (0–10 см). Исключением является станция TTR20-AR196G (Северо-Восточное плато),

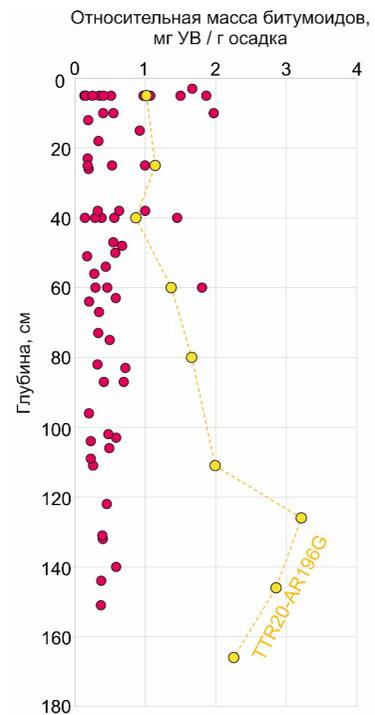


Рис. 4. Профиль вертикального распределения относительной массы битумоидов в осадках по результатам экстракции (72 образца из 18 станций)

в отложениях которой с увеличением глубины наблюдается резкий рост относительной массы битумоидов, достигающей значений 2–3,2 мг УВ/г осадка.

Битумоиды донных отложений обладают неоднородным групповым составом и незакономерно распределены вдоль изученных разрезов. Содержание асфальтенов варьирует в очень широком диапазоне от 9 до 89 % битумоида (среднее – 42%). Наибольшей долей асфальтенов характеризуются экстракты приповерхностного интервала (среднее – 63%), что, вероятно, указывает на преобладание сингенетического ОВ в поверхностных осадках.

В составе мальтенов образцов доминирует фракция смол (среднее – 62%), что характерно для непреобразованного исходного ОВ придонных осадков (рис. 5). Лишь в некоторых образцах из восьми станций пробоотбора, представляющих все районы, суммарный вклад насыщенной и ароматической фракций составил более 50% в составе мальтенов. В трех колонках, отобранных на поднятии Персея, интервалы с облегченным фракционным составом мальтенов преобладали по разрезу.

Согласно концепции поверхностных геохимических поисковых методов, для аномальных битуминологических полей характерно «облегчение» состава ОВ (Старобинец, Петухов, 1993), отраженное в относительно повышенном содержании насыщенной и ароматической фракций. Для сингенетического ОВ характерен, наоборот, «тяжелый» состав, доминирующими в котором являются смолисто-асфальтеновые УВ соединения. Исходя из этого, на основании результатов анализа состава экстрактов в качестве аномальных были определены 11 станций, характеризующих весь полигон исследований, в разрезах которых присутствовали интервалы с относительно «облегченным» составом ОВ. Дальнейшее исследование молекулярного состава ОВ (ХМС анализ) было сосредоточено именно

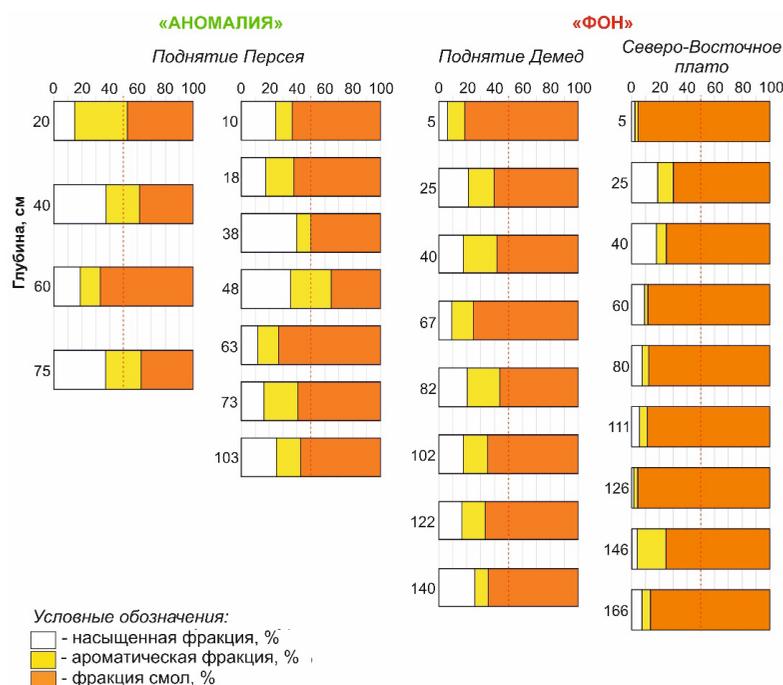


Рис. 5. Примеры профилей вертикального распределения фракционного состава мальтенов (в процентах) по разрезу колонок двух аномальных и двух фоновых станций

на этих станциях. Также для сравнения были выбраны две фоновые станции, отобранные на поднятии Демед, с сингенетичным ОВ в отложениях, генезис которого был установлен по результатам выполненных исследований.

Для характеристики опробованных станций на ХМС анализ обычно выбирались образцы из верхней (до 25 см), средней (25–70 см) и нижней (более 70 см) секций разрезов. В общей сложности анализ молекулярного состава ОВ был выполнен для 37 образцов донных отложений из 13 станций.

При изучении молекулярного состава ОВ донных отложений в насыщенной фракции экстрактов образцов идентифицированы нормальные и изоалканы, регулярные и диастераны, три- и тетрациклические терпаны, гопены и гопаны.

Н-алканы и изопrenoиды. Среди н-алканов в экстрактах определены гомологи состава C_{12} - C_{40} , при этом низкомолекулярные соединения с длиной цепи C_{17} и менее присутствуют в следовых концентрациях. По характеру распределения н-алканов все пробы можно поделить на две группы:

1. К первой группе относятся образцы осадков с незрелым ОВ, характеризующиеся «пилообразным» распределением четных и нечетных гомологов (рис. 6), свойственным для ОВ современных осадков. По молекулярному весу доминирующих н-алканов все экстракты с незрелым ОВ можно поделить на несколько подгрупп:

1.1. с доминированием нечетных высокомолекулярных н-алканов состава C_{23} - C_{29} (рис. 6А);

1.2. с бимодальным распределением – нечетностью н-алканов состава C_{25} - C_{31} и четностью н-алканов в диапазонах C_{18} - C_{22} и C_{34+} (рис. 6Б).

2. Вторая группа характеризуется относительно «плавным» распределением четных и нечетных гомологов, которое, как правило, наблюдается в нефтяных УВ (рис. 7).

Характер распределения н-алканов первой группы образцов с незрелым ОВ будет отражать процессы ранней трансформации ОВ в донных отложениях и генезис основных продуцентов ОВ. Доминирование нечетных высокомолекулярных н-алканов состава C_{23} - C_{29} (рис. 6А), вероятно, отображает нормальную морскую седиментацию, так как данные соединения характерны для некоторых разновидностей водных макрофитов (Ficken et al., 2000). Помимо явного максимума в распределении н-алканов, приходящегося на C_{23} - C_{29} , в экстрактах из образцов одной станции с поднятия Персея и двух станций с Северо-Восточного плато наблюдается локальный максимум в низкомолекулярной области, приходящийся на четные н-алканы состава C_{20} - C_{22} . Еще в одном экстракте из образца с Северо-Восточного плато локальный максимум приходится на C_{18} - C_{22} . В высокомолекулярной области (C_{36} - C_{40}) в большинстве экстрактов из данной группы происходит смена преобладания н-алканов с нечетным количеством атомов углерода на четные, в результате которой наблюдается незначительное преобладание н-алканов состава C_{36} , C_{38} и C_{40} над соседними гомологами. Все это может указывать на наличие процессов трансформации ОВ, так как появление четных гомологов, вероятно, связано с действием микробных сообществ (Elias et al., 1997; Пошибаева, 2015; Гаретова и др., 2018). Индекс CPI (Carbon Preference Index) (Bray, Evans, 1961), рассчитанный по формуле $CPI = 2 * (C_{23} + \dots + C_{31}) / ((C_{22} + \dots + C_{30}) + (C_{24} + \dots + C_{32}))$, варьирует от 1,41 до 2,95 при среднем значении 1,98. Это подтверждает низкую степень зрелости ОВ.

Существенно отличаются по н-алкановому распределению экстракты приповерхностного интервала (0–10 см) всех станций, а также три экстракта из более глубоких горизонтов, опробованных в двух станциях на поднятии Персея и в одной станции на поднятии Демед. Они были отнесены ко второй подгруппе первой группы. В них

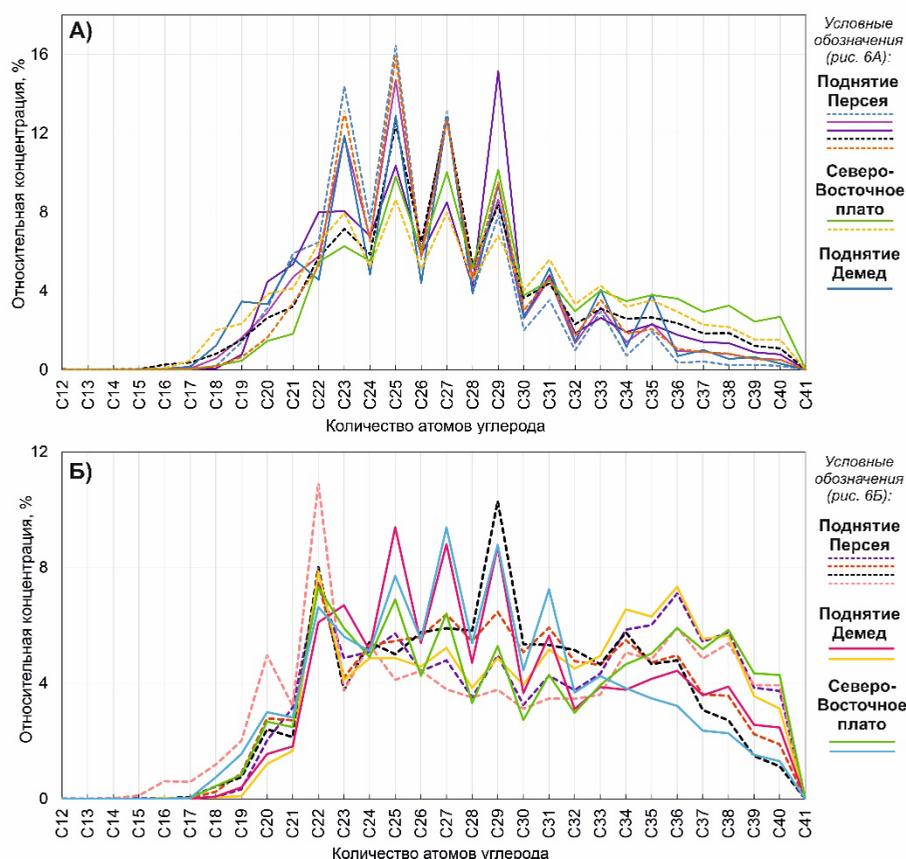


Рис. 6. Распределение *n*-алканов в экстрактах осадков с незрелым ОБ (первая группа): А) экстракты с доминированием нечетных высокомолекулярных *n*-алканов состава C₂₃-C₂₉, характерным для морского незрелого ОБ; Б) экстракты приповерхностного интервала (0–10 см) станций – с преобладанием четных *n*-алканов над нечетными в диапазонах C₁₈-C₂₂ и C₃₄₊, с сохранением нечетности в области C₂₅-C₃₁, характерным для бактериально трансформированного морского ОБ

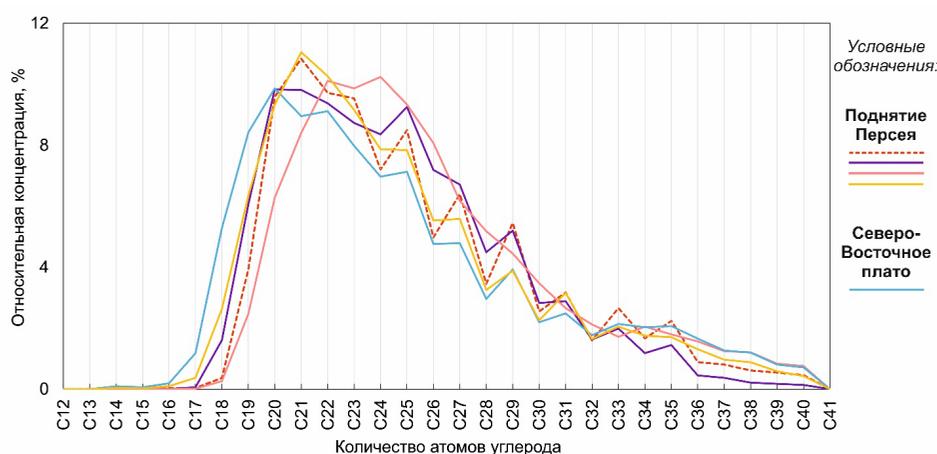


Рис. 7. Распределение *n*-алканов в экстрактах осадков с наличием миграционных УВ

наблюдается «горб» в высокомолекулярной области спектра (C₃₄₊), в котором доминируют четные *n*-алканы (рис. 6Б). В области C₂₅-C₃₁ преобладают нечетные гомологи, однако по сравнению с экстрактами из более глубоких интервалов станций (подгруппа 1.1) их вклад в общее распределение менее значителен. В низкомолекулярной области для всех экстрактов характерны локальные максимумы, приуроченные к *n*-C₂₀ и *n*-C₂₂. Индекс CPI варьирует от 0,68 до 1,88 при среднем 1,2. Значения CPI, близкие к 1, характерны для зрелых УВ. Однако в данном случае низкие значения CPI скорее объясняются существенным вкладом биомассы бактерий

(Гаретова и др., 2018). Таким образом, характер распределения *n*-алканов в приповерхностном слое осадков позволяет сделать вывод о существенной трансформации ОБ, так как доминирование четных гомологов в различных областях спектра в совокупности с практически полным отсутствием низкомолекулярных гомологов может объясняться только бактериальной активностью (Гаретова и др., 2018).

Различия в характере распределения *n*-алканов сингенетического ОБ донных отложений района исследований хорошо объясняются, исходя из региональной смены обстановок осадконакопления в позднечетвертичное

время. В плейстоценовое время Баренцевоморье было подвержено масштабному оледенению, и такие условия не могли способствовать высокой биопродуктивности. Отступление ледника началось в конце плейстоцена. Полная дегляциация, последовавшее повышение уровня моря и адвекция североатлантического течения обусловили повышение температуры и резкое возрастание продуктивности моря (Иванова, Мурдмаа, 2021). В проанализированных осадочных колонках «запечатлен» переход от перегляциальных обстановок к существенно более тепловодным современным условиям с высокой биопродуктивностью. Поэтому количество сингенетичных УВ в отложениях увеличивается вверх по разрезу, что также находит отражение в результатах пиролитических исследований и изучения группового состава хлороформенных экстрактов. Увеличение количества сингенетичного ОВ в совокупности с общим повышением температуры способствовало также росту интенсивности бактериальных процессов (Ильинский, Семененко, 2001) и масштаб биотрансформации современных придонных осадков. Это отражено в молекулярном составе ОВ исследованных образцов приповерхностных илов.

Ко второй группе отнесены экстракты из отложений, опробованных на трех станциях на поднятии Персея и одной станции на Северо-Восточном плато. Они существенно отличаются от «незрелых» экстрактов первой группы. Вторая группа характеризуется относительно «плавным» распределением четных и нечетных гомологов (рис. 7), которое, как правило, наблюдается в нефтяных УВ (Тиссо, Вельте, 1981), а, значит, образцы, вероятно, содержат эпигенетичное ОВ, мигрировавшее из глубин осадочного разреза.

Значения индекса СРІ для второй группы экстрактов низкие и варьируют от 0,98 до 1,39 (среднее – 1,19). В высокомолекулярной области (C_{25} - C_{35}) наблюдается незначительное доминирование нечетных гомологов, в то время как в низкомолекулярной области спектра (C_{16} - C_{21}) концентрации четных и нечетных n-алканов близкие. Это, скорее всего, отражает наличие разных соотношений сингенетичного и зрелого эпигенетичного ОВ. В целом, описываемые экстракты весьма схожи по характеру распределения n-алканов.

Значения отношения изопреноидных алканов пристана и фитана (Pr/Ph) для всех анализируемых экстрактов меньше единицы (0,03–0,98, при среднем 0,25), что указывает на морские восстановительные обстановки накопления исходного ОВ (Петров, 1984).

Биомаркерные параметры зрелости ОВ. Среди тритерпеноидов в изученных образцах были идентифицированы биогапаны ($\beta\beta$ -конфигурации), моретаны ($\beta\alpha$ -конфигурации), гопены, а также геогапаны ($\alpha\beta$ -конфигурации) (рис. 8).

Повышенные концентрации биологических гапанов и гопенов в изученных отложениях свидетельствует о существенном вкладе ОВ низкой, раннедиагенетической степени зрелости (Каширцев, 2001; Гринько и др., 2020). Доля геогапанов среди общего содержания тритерпеноидов варьирует от 14,6 до 50,9%. Данное значение закономерно варьирует по разрезу станций. Соотношения геогапанов, биогапанов, моретанов и гопенов, установленное для заведомо «фоновых» отложений без признаков

эпигенетичного ОВ, использовалось для выявления интервалов отложений с аномально повышенной концентрацией геогапанов, свидетельствующей о миграционной природе части УВ в донных илах. Наибольшее количество таких интервалов обнаружено в разрезах станций, опробованных на поднятии Персея (рис. 9).

Среди трисноргопанов (тритерпаны состава C_{27}) идентифицированы изомеры Ts (18 α (H)-22, 29, 30-триснорнеогопан), Tm (17 α (H)-22, 29, 30-трисноргопан), а также изомер T β (17 β (H)-22, 29, 30-трисноргопан) и непредельный гопен Te (17 α (H)-22, 29, 30-трисноргоп-(17,21)-ен), вероятно, являющийся предшественником своих предельных аналогов. Последние два являются крайне нестабильными, поэтому в составе нефтей они обычно отсутствуют. Вместе с тем, согласно опубликованным данным, их высокие концентрации характерны для незрелого ОВ современных осадков (Boitsov et al., 2011; Петрова и др., 2015; Моргунова и др., 2018; Гринько и др., 2020). Изомер Ts имеет катагенетическое происхождение, поэтому его обнаружение в осадках может быть результатом подтока нефтяных УВ. В ОВ большинства образцов Ts содержится в следовых количествах, а изомеры Tm и T β явно доминируют над ним. Так, в образцах из фоновых станций значения параметра Ts/(Ts+Tm) минимальны и варьируют от 0,10 до 0,14 (рис. 10В). В изученных образцах остальных станций данные значения несколько выше (до 0,43, среднее – 0,26). Лишь в одном образце с поднятия Персея (TTR20-AR168G 50–60 см) содержание изомера Ts несколько превышает содержание Tm (Ts/(Ts+Tm) = 0,61), что указывает на большую долю катагенетически преобразованного (середина ГЗН) ОВ в составе донных отложений (Peters et al., 2005).

Гапаноиды состава C_{29} представлены норгопанами H29 $\alpha\beta$, H29 $\beta\beta$, норморетаном (H29 $\beta\alpha$), норнеогопаном (H29Ts), а также неогоп-13(18)-еном. Гапаноиды состава C_{30} – эпимерами H30 $\alpha\beta$, H30 $\beta\beta$ и H30 $\beta\alpha$ и гопенами: диплоптен (гоп-22(29)-еном), неогоп-13(18)-еном и гоп-17(21)-еном. Гопены (особенно диплоптен) встречались редко. В большинстве экстрактов идентифицирован диагопан – структурный изомер гопана C_{30} , отличающийся от последнего наличием метильного заместителя у C_{15} вместо C_{14} . Значения параметра 30d/H30 $\alpha\beta$ в образцах фоновых станций не превышают 0,05 и увеличиваются до 0,09–0,15 в образцах из трех станций с поднятия Персея и одной станции с Северо-Восточного плато (рис. 10В). В данном случае повышенные концентрации диагопана маркируют образцы с более термически преобразованным ОВ, так как наблюдается их прямая зависимость от значений других параметров зрелости.

Также было установлено наличие в ОВ осадков гомоганов состава C_{31} - C_{34} . Их гомологи состава C_{35} присутствовали в ряде образцов в следовых количествах. Значения отношения эпимеров S- и R-гомоганов состава C_{31} (коэффициент 22S/(22S+22R)) в образцах фоновых станций варьируют от 0,12 до 0,18. Максимальные значения (0,35–0,43) установлены в образцах из пяти станций с поднятия Персея. Для эпимеров состава C_{32} значения аналогичного коэффициента несколько выше – в фоновых образцах от 0,23 до 0,33; максимальные – 0,4–0,49 – в отдельных станциях, представляющих все районы исследований. Такие значения несколько ниже равновесных

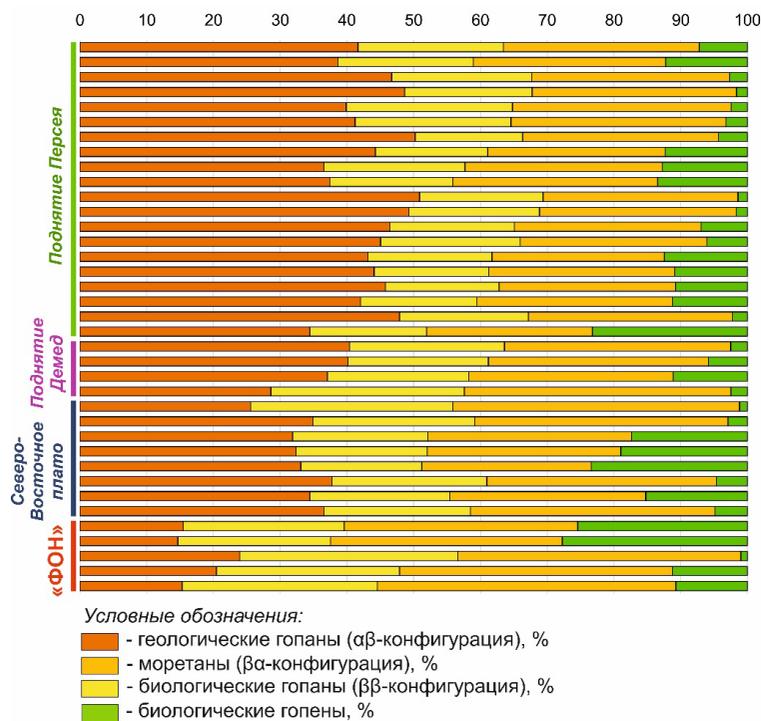


Рис. 9. Состав тритерпеноидов в экстрактах из осадков

а также перегруппированные стераны (диа-стераны) – αβ-конфигурации. В фоновых образцах преобладают биологические структуры (значения параметра $bb/(aa+bb)C_{29}$ лежат в диапазоне 0,31–0,38), особенно эписмеры, имеющие при 20-м углеродном атоме R-конфигурацию. Они являются наименее устойчивыми, поэтому в ходе термического созревания ОБ переходят в S-эписмеры (Peters et al., 2005). Таким образом, доминирование R-эписмеров свидетельствует о низкой степени зрелости ОБ образцов фоновых станций (величины параметра $aa20S/(S+R)C_{29}$ варьируют от 0,05 до 0,13) (рис. 10Б). Такой же вывод можно сделать и по проявлению в общем распределении диастеранов. Так, величина отношения диастеранов к регулярным составу C_{27} (диа/рег C_{27}), сильно зависящая от степени зрелости ОБ, в образцах фоновых станций варьирует от 0,03 до 0,17 (среднее – 0,08). Однако был выявлен ряд станций (шесть станций на поднятии Персея и одна станция на Северо-Восточном плато), в образцах из которых распределение стеранов несколько отличается: преобладание 20R-эписмеров менее резкое, относительные концентрации геостеранов

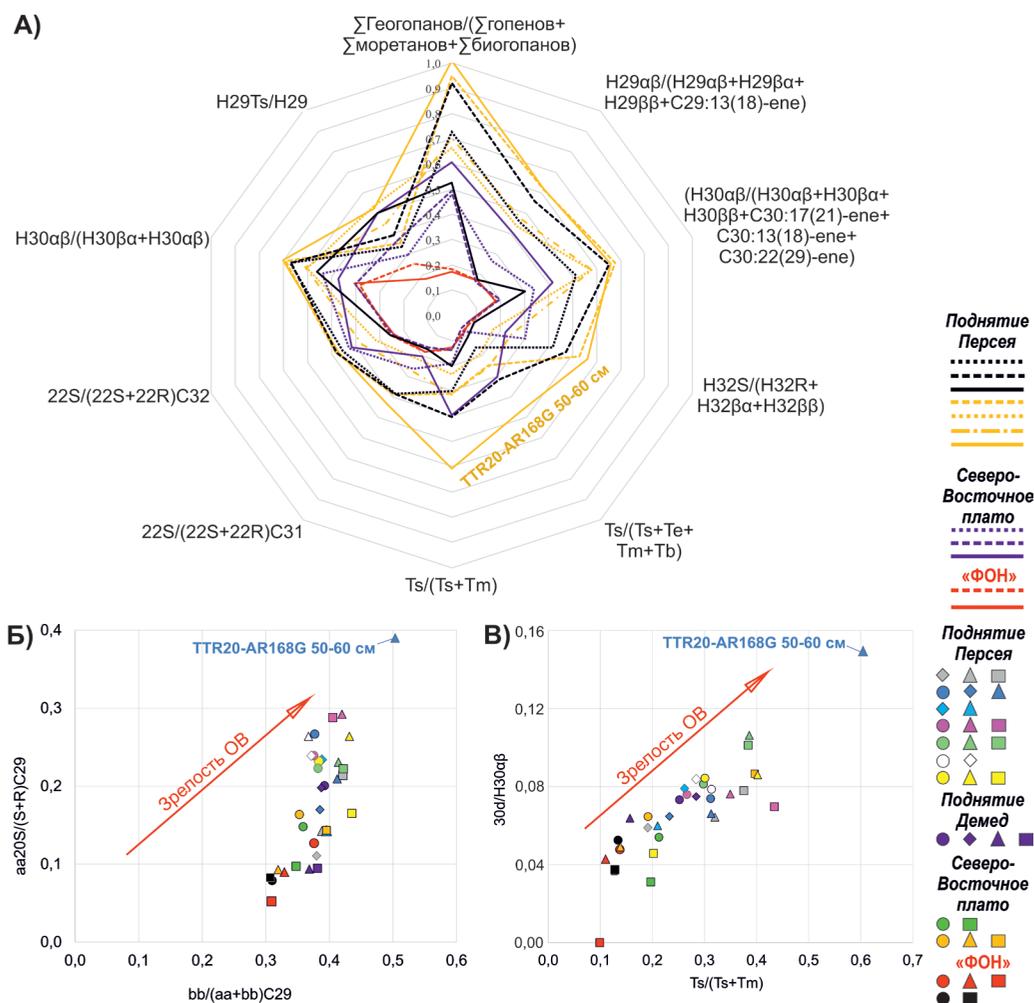


Рис. 10. А – лепестковая диаграмма величин отношений биомаркерных параметров тритерпанового ряда в экстрактах осадков; Б – график соотношения параметров зрелости $bb/(aa+bb)C_{29}$ и $aa20S/(S+R)C_{29}$ изомеров стеранов в экстрактах осадков; В – график соотношения параметров зрелости $Ts/(Ts+Tm)$ и диагопан/гопан C_{30} в экстрактах осадков. Для Б и В одноцветные значки представляют образцы, отобранные вдоль разреза одной станции с разных горизонтов. Кружки обозначают образцы, отобранные из интервала 0–10 см, ромбы – 15–25 см, треугольники – 25–65 см, квадраты – более 70 см

и диастеранов более высокие в сравнении с фоновым распределением. Так, величины параметра $bb/(aa+bb)C_{29}$ достигают 0,40–0,51; $aa20S/(S+R)C_{29} - 0,21-0,39$ (рис. 10Б); $диа/рег C_{27} - 0,30-0,46$.

Наибольшие значения биомаркерных параметров зрелости ОБ установлены в экстракте из интервала 50–60 см колонки TTR20-AR168G (поднятия Персея), в то время как в экстрактах из вышележащих интервалов той же колонки значения аналогичных параметров существенно ниже. В целом, неравномерное распределение величин коэффициентов зрелости ОБ по разрезу характерно для всех аномальных станций.

В ароматической фракции растворимой части ОБ донных осадков идентифицированы соединения фенантренового ряда, сероароматические соединения дибензотиофенового ряда и триароматические стероиды. Их содержание в большинстве экстрактов крайне мало. Максимальные концентрации среди полиароматических соединений приходятся на ретен, являющийся маркером высшей растительности (Villar et al., 1988). Значения метилдибензотиофенового индекса (4MDBT/1MDBT), который увеличивается со степенью зрелости ОБ (Radke et al., 1986), в фоновых образцах варьируют от 0,8 до 1,2. Максимальные значения данного параметра (3,7–5,7) приходятся на образцы из двух станций с поднятия Персея и одной станции с Северо-Восточного плато. Значения отношения низкомолекулярных к высокомолекулярным триароматическим стероидам ($TA(20-21)/(TA(20-21)+TA(26-28))$) в образцах фоновых станций не превышают 0,39 и достигает максимума (0,42–0,68) в образцах из трех колонок, отобранных на поднятии Персея, и двух, отобранных на Северо-Восточном плато, характеризую высокую степень преобразованности ОБ (Peters et al., 2005).

Таким образом, анализ биомаркерных параметров зрелости ОБ показал, что на исследуемой площади в донных осадках содержатся эпигенетические УВ, имеющие высокую термическую зрелость. Такие «аномальные» разрезы были вскрыты на семи станциях в пределах поднятия Персея, единожды на поднятии Демед и дважды на Северо-Восточном плато.

Чтобы охарактеризовать предполагаемую нефтематеринскую толщу, являющуюся источником миграционных УВ соединений верхней части осадочного разреза, были проанализированы биомаркерные параметры обстановок накопления и природы исходного ОБ.

Биомаркерные параметры состава и условий накопления исходного ОБ. Надежным критерием оценки типа исходного ОБ является соотношение в его составе стеранов состава C_{27} , C_{28} и C_{29} (Huang, Meinshein, 1979). В работе при расчетах использовалась сумма регулярных стеранов. Так, на треугольной диаграмме соотношения стерановых УВ видно, что ОБ образцов характеризуется смешанным составом и приурочено к морским обстановкам накопления (рис. 11). Таким образом, можно предположить, что источником нефтяных УВ в осадках является нефтегазоматеринская толща со смешанным типом ОБ. При этом в нескольких экстрактах из образцов с поднятия Персея преобладают гомологи состава C_{29} , что говорит о значительном вкладе в состав исходного ОБ гумусовой компоненты. Это может быть

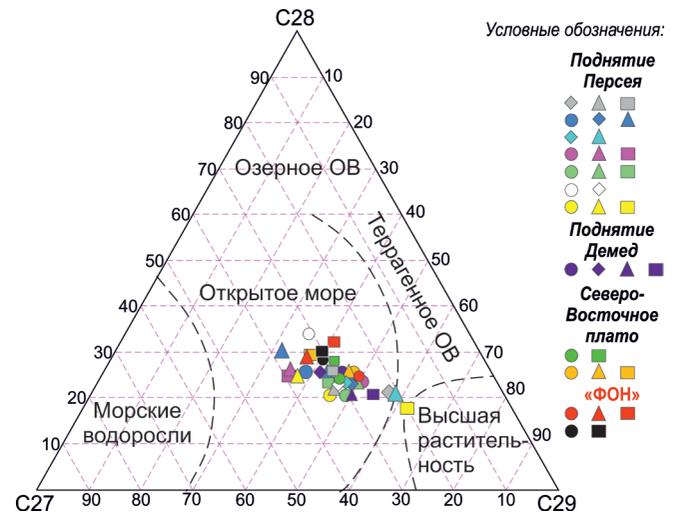


Рис. 11. Соотношение регулярных стеранов в экстрактах донных осадков (Huang, Meinschein, 1979). Одноцветные значки представляют образцы, отобранные вдоль разреза одной станции с разных горизонтов. Кружки обозначают образцы, отобранные из интервала 0–10 см, ромбы – 15–25 см, треугольники – 25–65 см, квадраты – более 70 см

связано как с неоднородностью состава сингенетического ОБ осадков, так и с иным, отличным по геохимическим характеристикам, источником миграционных УВ.

На распределение биомаркеров в составе ОБ значительно влияют литологические характеристики вмещающих отложений. Судя по значениям отношений адиантана (гопана состава C_{29}) относительно гопана C_{30} ($H29/H30 < 0,6$), а также тетрациклического терпана T24 относительно трициклического t26 ($T24/t26 < 0,5$) (Connan et al., 1986), ОБ осадков формировалось в морских глинистых отложениях. Аналогичный вывод можно сделать на основании величин отношения трициклических терпанов t24 и t23, которые в подавляющем большинстве анализируемых образцов превышают граничное для карбонатов значение 0,5 (Peters et al., 2005).

Так как большинство экстрактов из аномальных станций характеризуется схожими условиями формирования и составом исходного ОБ, можно предположить для них единый источник миграционных УВ внутри осадочного разреза района исследований. Ввиду отсутствия kernового материала из северной части Баренцева моря точно установить конкретную материнскую породу не представляется возможным. Поэтому была выполнена попытка корреляции на основании сравнительного анализа молекулярных составов экстрактов донных осадков и нефтегазоматеринских пород, отобранных из обнажений на архипелагах Шпицберген и Земля Франца Иосифа. Так, для экстрактов среднетриасовых аргиллитов характерно схожее с аномальным распределение n-алканов (одномодалное с максимумом в области $C_{18}-C_{22}$), низкие значения отношения Pt/Ph (от 0,3 до 1,2), а также соотношение стерановых УВ ($C_{27}:C_{28}:C_{29}$ как 33:25:42), свидетельствующее о преимущественно морских обстановках накопления ОБ (Кирюхина и др., 2012; Норина, 2014). Глубина залегания среднетриасовых пород в пределах района исследований варьирует в широких пределах – от 0 до 4–4,5 км (Старцева и др., 2017). Поэтому очагом генерации миграционных флюидов могли служить

наиболее погруженные части осадочного разреза Северо-Баренцевской депрессии, вошедшие в главную зону нефтеобразования (Ступакова и др., 2021).

Выводы

Относительные концентрации растворимой части ОВ в осадках северного сектора Баренцева моря варьируют от 0,14 до 3,2 мг УВ/г осадка. При этом наибольшие значения характерны для самого приповерхностного интервала разрезов.

Групповой состав ОВ донных отложений неоднороден и изменяется по разрезу независимо от глубины залегания. Как правило, в нем доминируют смолисто-асфальтеновые компоненты. Наибольшей долей асфальтенов в составе ОВ характеризуются осадки приповерхностного интервала. Лишь в некоторых изученных разрезах интервалы с облегченным составом ОВ преобладают, указывая на возможный подток миграционных углеводородных соединений из глубокопогруженных частей осадочного разреза.

Молекулярный состав ОВ донных отложений существенно неоднороден. Большинство экстрактов характеризуется «пилообразным» распределением n-алканов с максимумами у высокомолекулярных нечетных гомологов, что указывает на низкую степень термической преобразованности современного ОВ и значительный вклад гидробионтов в его формирование. Для приповерхностных интервалов (0–10 см) изученных разрезов характерны высокие концентрации n-алканов с длиной цепи C₃₄ и более, среди которых доминируют четные гомологи, вероятно, бактериальной природы. Лишь для нескольких проанализированных образцов установлено близкое к нефтяному распределение n-алканов, свидетельствующее о присутствии в составе ОВ осадков катагенетически зрелых УВ соединений миграционной природы. Эпигенетические флюиды, обнаруженные в разных изученных разрезах, схожи по распределению n-алканов между собой, что может указывать на единый источник УВ в осадочной толще района исследований. Биомаркерные параметры обстановок накопления указывают на схожие условия формирования материнской толщи для миграционных флюидов, изученных в образцах донных отложений.

В молекулярном составе ОВ осадков установлено наличие как гео-, так и биогопанов, а также моретанов и гопенов. Для большинства разрезов характерны минимальные концентрации геогопанов. Высокие концентрации геогопанов в разрезах, отобранных на некоторых станциях, подтверждают предположение о подтоке УВ из глубоких частей осадочного бассейна на некоторых («аномальных») участках исследованного района. Тем не менее, и на таких участках миграционная УВ компонента распределена неравномерно и характерна лишь для отдельных интервалов опробованного разреза. Последнее может объясняться различной сорбционной способностью отложений, вмещающих УВ. Величины биомаркерных коэффициентов зрелости свидетельствуют о достаточно высоком уровне термической преобразованности ОВ в образцах из «аномальных» районов.

Результаты исследований показывают, что участок восточного склона и подножья поднятия Персея

характеризуется высокой плотностью проявлений современной рассеянной УВ флюидоразгрузки, установленной по большому числу геохимических индикаторов. На западном склоне Северо-Восточного плато также возможен существенный подток УВ из недр. Поднятие Демед наименее перспективно из изученных участков.

Сравнение геохимических параметров миграционных УВ, установленных в изученных образцах донных отложений района исследований, с описанными в литературе характеристиками пород из обнажений близлежащих островных архипелагов (Шпицберген и Земля Франца Иосифа) позволило выдвинуть предположение о том, что источником эпигенетических УВ в отложениях «аномальных» участков могут служить глубоко погруженные среднетриасовые глинистые отложения, обогащенные ОВ смешанного типа.

Финансирование/Благодарности

Авторы выражают признательность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации за финансирование судового времени экспедиции ТТР-20 по программе «Обучение-через-исследования».

Часть исследований выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00293).

Литература

- Баренцевская шельфовая плита (1988). Ред. И.С. Грамберг. Ленинград: Недра, 264 с.
- Бурштар М.С. (1973). Основы теории формирования залежей нефти и газа. М.: Недра, 256 с.
- Галимов Э.М., Немченко-Ровенская А.С., Севастьянов В.С., Абля Э.А. (2008). Баренцево-Карский регион-новый объект поисково-разведочных работ на нефть и газ в XXI веке. *Недропользование XXI век*, (6), с. 43–53.
- Гаретова Л.А., Фишер Н.К., Левшина С.И. (2018). Состав донных отложений приливо-отливной акватории (юго-западный район Татарского пролива). *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, (3), с. 102–116.
- Гершелис Е.В., Кашапов Р.С., Рубан А.С., Оберемок И.А., Леонов А.А., Черных Д.В., Дударев О.В., Семилетов И.П. (2020). Исследование состава органического вещества донных осадков моря Лаптевых с применением метода Rock-Eval. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 331(8), с. 189–198. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2780>
- Гордадзе Г.Н., Гируц М.В., Кошелев В.Н. (2012). Органическая геохимия углеводородов. Кн. 1. М.: РГУ нефти и газа, 392 с.
- Гринько А.А., Гончаров И.В., Шахова Н.Е., Густафссон О., Обласов Н.В., Романкевич Е.А., Зарубин А.Г., Кашапов Р.С., Гершелис (Панова) Е.В., Дударев О.В., Мазуров А.К., Семилетов И.П. (2020). Характерные особенности молекулярного состава органического вещества осадков моря Лаптевых в районах аномального выброса метана. *Геология и геофизика*, 61(4), с. 560–585.
- Егошина Е.Д., Видищева О.Н., Полудеткина Е.Н., Валиева Э.И., Соловьева М.А., Ахманов Г.Г. (2020). Состав и происхождение газов из донных отложений СВ Баренцева моря (по результатам экспедиции ТТР-19). *Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)»*. М.: ООО «ПолиПРЕСС», с. 86–89.
- Иванова Е.В., Мурдмаа И.О. (2021). Послеледниковая палеоокеанология Баренцева моря. Система Баренцева моря. М.: «Издательство ГЕОС», с. 109–126.
- Ильинский В.В., Семенов М.Н. (2001). Распространение и активность углеводородоокисляющих бактерий в Карском и Белом морях. Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный Мир, с. 364–375.
- Казанин Г.С., Шлыкова В.В., Павлов С.П., Шкарубо С.И., Иванов Г.И., Кириллова-Покровская Т.А. (2016). Геологическое строение и нефтегазоносность северной части Баренцева моря. *Нефть. Газ. Новации*, (1), с. 26–29.

- Каширцев В.А. (2001). Органическая геохимия горючих ископаемых (новые направления в исследованиях каустобиолитов). *Наука и техника в Якутии*, 1(1), с. 23–27.
- Кирюхина Н.М. (2013). Нефтегазогенерационный потенциал юрских отложений шельфа Баренцева моря. *Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ*, 151 с.
- Кирюхина Т.А., Ступакова А.В., Большакова М.А., Кирюхина Н.М., Норина Д.А. (2012). Мезозойские нефтегазоматеринские отложения Баренцевоморского нефтегазоносного бассейна. *Геология нефти и газа*, (3), с. 24–35.
- Коржов Ю.В., Головкин А.К. (1994). Изменение состава моно- и биаренов при моделировании фильтрации нефти через породы. *Геохимия*, (10), с. 1503–1509.
- Меленевский В.Н., Леонова Г.А., Кобышев А.С. (2011). Результаты исследования органического вещества современных осадков озера Белое (Западная Сибирь) по данным пиролитических методов. *Геология и геофизика*, 52 (6), с. 751–762.
- Мельников П.Н., Скворцов М.Б., Кравченко М.Н., Агаджанянц И.Г., Грушевская О.В., Уварова И.В. (2020). ГРП в Арктике: ресурсный потенциал и перспективные направления. *Деловой журнал Neftegaz.ru*, (1), с. 22–30.
- Моргунова И.П., Семенов П.Б., Крылов А.А., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Малышев С.А., Минами Х., Хачикубо А., Земская Т.И., Хлыстов, О.М. (2018). Углеводородные молекулярные маркеры в донных осадках зон фокусированной разгрузки флюидов озера Байкал. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 13(4). https://doi.org/10.17353/2070-5379/40_2018
- Немировская И.А., Храмова А.В., Халиков И.С., Колтовская Е.В., Соломатина А.С. (2021). Углеводороды в воде и осадках Норвежского и Баренцева морей. *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*, (4), с. 94–107. <https://doi.org/10.17076/lim1382>
- Норина Д.А. (2014). Строение и нефтегазоматеринский потенциал пермско-триасовых терригенных отложений Баренцевоморского шельфа. *Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ*, 208 с.
- Петров А.А. (1984). Углеводороды нефти. М.: Наука, 264 с.
- Петрова В.И., Батова Г.И., Куршева А.В., Литвиненко И.В., Моргунова И.П. (2015). Углеводороды в донных осадках Штокмановской площади: распределение, генезис, временные тренды. *Нефтегазовая геология. Теория и практика*, 10(3), 35. https://ngtp.ru/rub/1/35_2015.pdf
- Петухов А.В. (1981). Комплексный анализ данных геохимических поисков месторождений нефти и газа. М.: Недра, 262 с.
- Петухов А.В., Старобинец И.С. (1993). Основы теории геохимических полей углеводородных скоплений. М.: Недра, 332 с.
- Пошибаева А.Р. (2015). Биомасса бактерий как источник углеводородов нефти. *Дис. ... канд. хим. наук. М.: РГУ нефти и газа*, 124 с.
- Сенин Б.В., Леончик М.И., Ошерова Н.А. (2020). Сырьевая база нефтегазодобычи Баренцева моря и перспективные направления ее развития. Минеральные ресурсы России. *Экономика и управление*, (6), с. 21–31.
- Соловьева М.А., Видишева О.Н., Ахманов Г.Г., Монтели А.И. (2020) Современная и палео-флюидоразгрузка в северо-восточной части Баренцева моря: геолого-геофизическая характеристика по данным экспедиции TTR-19. *Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)»*. М.: ООО «ПолиПРЕСС», с. 83–85.
- Старцева К.Ф., Никишин А.М., Малышев Н.А., Никишин В.А., Валюшева А.А., Волож Ю.А., Балувев А.С. (2017). Геологическая и геодинамическая реконструкция Восточно-Баренцевского мегабассейна на основе анализа регионального сейсмического профиля 4-AP. *Геотектоника*, (4), с. 51–67.
- Ступакова А.В. (2011). Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий. *Геология нефти и газа*, (6), с. 99–115.
- Ступакова А.В., Большакова М.А., Сулова А.А., Мордасова А.В., Осипов К.О., Ковалевская С.О., Колесникова Т.О., Шевченко Г.А., Мастерков И.А., Цыганкова А.А., Гильмуллина А.А. (2021). Нефтегазоматеринские толщи Баренцево-Карского шельфа: область распространения и свойства. *Георесурсы*, 23(2), с. 6–25. <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.1>
- Тиссо Б., Вельте Д. (1981). Образование и распространение нефти: пер. с англ. М.: Мир, 501 с.
- Флоровская В.Н. (1957). Люминесцентно-битуминологический метод в нефтяной геологии. М.: Изд-во Московского университета, 291 с.
- Чахмахчев В.А. (1983). Геохимия процесса миграции углеводородных систем. М.: Недра, 231 с.
- Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliyambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingsdal R., Mienert J., Bünz S. (2017). Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 356(6341), pp. 948–953. <https://doi.org/10.1126/science.aal4500>
- ASTM D 4124 – 09. Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions; Publication Date 2009-07-01. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 8 p.
- Bludd E.K. (2023). New volcano discovered in the Barents Sea. https://en.uit.no/news/article?p_document_id=811821
- Blumenberg M., Lutz R., Schlömer S., Krüger M., Scheeder G., Berglar K., Heyde I., Weniger P. (2016). Hydrocarbons from near-surface sediments of the Barents Sea north of Svalbard—indication of subsurface hydrocarbon generation? *Marine and Petroleum Geology*, 76, pp. 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.031>
- Boitsov S., Petrova V., Jensen H.K., Kursheva A., Litvinenko I., Chen Y., Klungsoyr J. (2011). Petroleum-related hydrocarbons in deep and subsurface sediments from South-Western Barents Sea. *Marine environmental research*, 71(5), pp. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.04.003>
- Bray E.E., Evans E.D. (1961). Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 22 (1), pp. 2–15. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(61\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(61)90069-2)
- Chand S., Mienert J., Andreassen K., Knies J., Plassen L., Fotland B. (2008). Gas hydrate stability zone modelling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggests an active hydrocarbon venting system. *Marine and Petroleum Geology*, 25(7), pp. 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.006>
- Connan J., Bouroulllec J., Dessort D., Albrecht P. (1986). The microbial input in carbonate-anhydrite facies of a sabkha palaeoenvironment from Guatemala: a molecular approach. *Organic Geochemistry*, 10(1–3), pp. 29–50. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90007-0)
- Dowdeswell J. A., Montelli A., Akhmanov G., Solovyeva M., Terekhina Y., Mironyuk S., Tokarev M. (2021). Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms. *Geology*, 49(12), pp. 1484–1488. <https://doi.org/10.1130/G49252.1>
- Elias V.O., Simoneit B.R., Cardoso J.N. (1997). Even n-alkane predominance on the Amazon shelf and a Northeast Pacific hydrothermal system. *Naturwissenschaften*, 84, pp. 415–420. <https://doi.org/10.1007/s001140050421>
- Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. (2000). An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochem*, 31, pp. 745–749. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00081-4)
- Henriksen E., Bjørnseth H.M., Hals T.K., Heide T., Kiryukhina T., Kløvjan O.S., Sollid K. (2011). Uplift and erosion of the greater Barents Sea: impact on prospectivity and petroleum systems. Geological Society, London, *Memoirs*, 35, pp. 271–281. <https://doi.org/10.1144/M35.17>
- Huang W.Y., Meinschein W.G. (1979). Sterols as ecological indicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 43(5), pp. 739–745. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90257-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90257-6)
- Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G., Mazzini A., Piatilova A., Bakay E., Dowdeswell J. A. (2023). The geomorphic record of marine-based ice dome decay: final collapse of the Barents Sea ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 303, 107973. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.107973>
- Murdmann I., Ivanova E., Duplessy J., Levitan M., Khusid T., Bourman M., Alekhina G., Alekseeva T., Belousov M., Serova V. (2006). Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present. *Marine Geology*, 230(3–4), pp. 275–303. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.06.001>
- Niemann H., Lösekann T., De Beer D., Elvert M., Nadalig T., Knittel K., Amann R., Sauter E.J., Schlüter M., Klages M., Foucher J.P., Boetius A. (2006). Novel microbial communities of the Haakon Mosby mud volcano and their role as a methane sink. *Nature*, 443(7113), pp. 854–858. <https://doi.org/10.1038/nature05227>
- Peters K.E., Moldowan J.M. (1993). The biomarker guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 363 p.
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005). The Biomarker Guide: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1156 p.
- Polyak L., Solheim A. (1994). Late- and postglacial environments in the northern Barents Sea west of Franz Josef Land. *Polar Research*, 13(2), pp. 197–207. <https://doi.org/10.3402/polar.v13i2.6693>
- Radke M., Welte D.H., Willsch H. (1986). Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter

type. *Organic Geochemistry*, 10(1–3), pp. 51–63. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90008-2)

Rise L., Bellec V.K., Chand S., Bøe R. (2015). Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords. *Norwegian Journal of Geology*, 94(4), pp. 263–282. <https://doi.org/10.17850/njg94-4-02>

Smirnov R.V. (2014). A revision of the Oligobrachiidae (Annelida: pogonophora), with notes on the morphology and distribution of *Oligobrachia haakonmosbiensis* Smirnov. *Marine Biology Research*, 10(10), pp. 972–982. <https://doi.org/10.1080/17451000.2013.872799>

Vidischeva O., Poludetkina E., Basova E., Dralina E., Bogdanov A., Bakay E., Man'ko I., Akhmanov G., Mazzini A. (2022). Hydrocarbons investigations from near-surface sediments of the north and northeastern Barents Sea shelves. *EGU General Assembly 2022*, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10172. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10172>

Villar H.J., Püttmann W., Wolf M. (1988). Organic geochemistry and petrography of Tertiary coals and carbonaceous shales from Argentina. *Organic geochemistry*, 13(4–6), pp. 1011–1021. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90283-5](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90283-5)

Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Patton H. (2016). Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates. *Nature Geoscience*, 9(5), pp. 370–374. <https://doi.org/10.1038/ngeo2696>

Сведения об авторах

Любовь Юрьевна Сигачева – магистр кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

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

e-mail: sigacheva_l@list.ru

Олеся Николаевна Видищева – кандидат геол.-минерал. наук, ведущий инженер кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

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

Антон Георгиевич Калмыков – кандидат хим. 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 Николаевна Полудеткина – кандидат геол.-минерал. 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

Григорий Георгиевич Ахманов – кандидат геол.-минерал. наук, доцент кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

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

Статья поступила в редакцию 13.09.2023;

Принята к публикации 16.11.2023;

Опубликована 30.12.2023

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Organic matter geochemical characteristics of bottom sediments of the northern Barents Sea as an indicator of hydrocarbon migration from deep source

L.Yu. Sigacheva*, O.N. Vidishcheva, A.G. Kalmykov, E.N. Poludetkina, G.G. Akhmanov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

*Corresponding author: Lyubov Yu. Sigacheva, e-mail: sigacheva_l@list.ru

Abstract. Group and molecular compositions of organic matter from bottom sediments of the northern sector of the Barents Sea were analysed. The sites where bottom sediments contain organic matter of molecular composition similar to that of oil are identified. Thermally mature hydrocarbon compounds detected in extracts from sediment samples indicates ongoing migration from deeply buried strata and fluid discharge processes on seafloor within the studied areas. Molecular compositions of extracts from bottom sediments were compared with and showed geochemical characteristics similar to some series described for the closest onshore to the study areas. That allows an assumption that the source for migrated hydrocarbons identified in studied bottom sediments can be Mid-Triassic organic-rich claystone intervals which are a part of sedimentary succession of the North Barents deep depression.

Keywords: Arctic shelf, the Barents Sea, bottom sediments, organic matter, fluid discharge, hydrocarbon-biomarkers

Recommended citation: Sigacheva L.Yu., Vidishcheva O.N., Kalmukov A.G., Poludetkina E.N., Akhmanov G.G. (2023). Organic matter geochemical characteristics of bottom sediments of the northern Barents Sea as an indicator of hydrocarbon migration from deep source.

Georesursy = Georesources, 25(4), pp. 42–57. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.3>

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Russian Ministry of Higher Education and Science for financing the ship time of the TTR-20 expedition of the “Training-through-research” program.

This work has been partly supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 23-27-00293).

References

Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H., Vadakkepuliambatta S., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Serov P., Deryabin A., Mattingsdal R., Mienert J., Bünn S. (2017). Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 356(6341), pp. 948–953. <https://doi.org/10.1126/science.aal4500>

ASTM D 4124 – 09. Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions; Publication Date 2009-07-01. West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International. 8 p.

Barents Shelf Plate (1988). Edited by I.S. Gramberg. Leningrad: Nedra, 264 p. (In Russ.)

Bludd E.K. (2023). New volcano discovered in the Barents Sea. https://en.uit.no/news/article?p_document_id=811821

Blumenberg M., Lutz R., Schlömer S., Krüger M., Scheeder G., Berglar K., Heyde I., Weniger P. (2016). Hydrocarbons from near-surface sediments

- of the Barents Sea north of Svalbard—indication of subsurface hydrocarbon generation? *Marine and Petroleum Geology*, 76, pp. 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.05.031>
- Boitsov S., Petrova V., Jensen H.K., Kursheva A., Litvinenko I., Chen Y., Klungsoyr J. (2011). Petroleum-related hydrocarbons in deep and subsurface sediments from South-Western Barents Sea. *Marine environmental research*, 71(5), pp. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2011.04.003>
- Bray E.E., Evans E.D. (1983). Distribution of n-paraffins as a clue to recognition of source beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 22 (1), pp. 2–15. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(61\)90069-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(61)90069-2)
- Burshtar M.S. (1973). Fundamentals of the theory of formation of oil and gas deposits. Moscow: Nedra. 256 p. (In Russ.)
- Chakhmakhchev V.A. (1983). Geochemistry of the migration process of hydrocarbon systems. Moscow: Nedra. 231 p. (In Russ.)
- Chand S., Mienert J., Andreassen K., Knies J., Plassen L., Fotland B. (2008). Gas hydrate stability zone modelling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggests an active hydrocarbon venting system. *Marine and Petroleum Geology*, 25(7), pp. 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.006>
- Connan J., Bouroulec J., Dessort D., Albrecht P. (1986). The microbial input in carbonate-anhydrite facies of a sabkha palaeoenvironment from Guatemala: a molecular approach. *Organic Geochemistry*, 10(1–3), pp. 29–50. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90007-0](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90007-0)
- Dowdeswell J. A., Montelli A., Akhmanov G., Solovyeva M., Terekhina Y., Mironyuk S., Tokarev M. (2021). Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms. *Geology*, 49(12), pp. 1484–1488. <https://doi.org/10.1130/G49252.1>
- Egoshina E.D., Vidishheva O.N., Poludetkina E.N., Valieva Je.I., Solov'eva M.A., Akhmanov G.G. (2020). Composition and origin of gases from the bottom sediments of the Barents Sea (based on the results of TTR-19 cruise). *Proc. IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)". Moscow: OOO «PoliPRESS», pp. 86–89. (In Russ.)*
- Elias V.O., Simoneit B.R., Cardoso J.N. (1997). Even n-alkane predominances on the Amazon shelf and a Northeast Pacific hydrothermal system. *Naturwissenschaften*, 84, pp. 415–420. <https://doi.org/10.1007/s001140050421>
- Ficken K.J., Li B., Swain D.L., Eglinton G. (2000). An n-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochem*, 31, pp. 745–749. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00081-4)
- Florovskaya V.N. (1957). Luminescent-bituminological method in petroleum geology. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 291 p. (In Russ.)
- Galimov E.M., Nemchenko-Rovenskaya A.S., Sevast'yanov V.S., Ablya E.A. (2008). The Barents-Kara region is a new object of prospecting and exploration for oil and gas in the 21st century. *Nedropol'zovanie XXI vek*, (6), pp. 43–53. (In Russ.)
- Garetova L.A., Fisher N.K., Levshina S.I. (2018). The composition of bottom sediments in the tidal water area (southwestern region of the Strait of Tartary). *Vodnoe hozyaystvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*, (3), pp. 102–116. (In Russ.)
- Gershelis E.V., Kashapov R.S., Ruban A.S., Oberemok I.A., Leonov A.A., Chernyh D.V., Dudarev O.V., Semiletov I.P. (2020). Identifying sources of organic carbon in surface sediments of Laptev Sea shelf using a Rock-Eval approach. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(8), pp. 189–198. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/8/2780>
- Gordadze G.N., Giruc M.V., Koshelev V.N. (2012). Organic Geochemistry of Hydrocarbons. Book. 1. Moscow: Gubkin University, 392 p. (In Russ.)
- Grinko A.A., Goncharov I.V., Shahova N.E., Gustafsson O., Oblasov N.V., Romankevich E.A., Zarubin A.G., Kashapov R.S., Gershelis (Panova) E.V., Dudarev O.V., Mazurov A.K., Semiletov I.P. (2020). Sediment Organic Matter in Areas of Intense Methane Release in the Laptev Sea: Characteristics of Molecular Composition. *Russ. Geol. Geophys.*, 61(4), pp. 456–477. <https://doi.org/10.15372/RGG2019150>
- Henriksen E., Bjørnseth H.M., Hals T.K., Heide T., Kiryukhina T., Kløvjan O.S., Sollid K. (2011). Uplift and erosion of the greater Barents Sea: impact on prospectivity and petroleum systems. Geological Society, London, Memoirs, 35, pp. 271–281. <https://doi.org/10.1144/M35.17>
- Huang W.Y., Meinschein W.G. (1979). Sterols as ecological indicators. *Geochimica et cosmochimica acta*, 43(5), pp. 739–745. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90257-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90257-6)
- Ilinikii V.V., Semenenko M.N. (2001). Distribution and activity of hydrocarbon-oxidizing bacteria in the Kara and White Seas. Experience of systemic oceanological research in the Arctic. Moscow: Nauchnyy Mir, pp. 364–375. (In Russ.)
- Ivanova E.V., Murdmaa I.O. (2021). Postglacial paleoceanology of the Barents Sea. Barents Sea System. Moscow: Izdatelstvo GEOS, pp. 109–126. (In Russ.)
- Kashircev V.A. (2001). Organic geochemistry of fossil fuels (new trends in the study of caustobolites). *Nauka i tehnika v Yakutii*, 1(1), pp. 23–27. (In Russ.)
- Kazanin G.S., Shlykova V.V., Pavlov S.P., Shkarubo S.I., Ivanov G.I., Kirillova-Pokrovskaya T.A. (2016). Geological structure and oil and gas potential of the northern Barents Sea. *Neft'. Gaz. Novacii*, (1), pp. 26–29. (In Russ.)
- Kiryuhina N.M. (2013). Oil and gas generation potential of the Jurassic deposits of the Barents Sea shelf. Cand. geol. and min. sci. diss. Moscow: MSU, 151 p. (In Russ.)
- Kiryuhina T.A., Stupakova A.V., Bolshakova M.A., Kiryuhina N.M., Norina D.A. (2012). Mesozoic oil and gas source deposits of the Barents Sea oil and gas basin. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, (3), pp. 24–35. (In Russ.)
- Korzhev Yu.V., Golovko A.K. (1994). Changes in the composition of mono- and biarenes when modeling oil filtration through rocks. *Geokhimiya = Geochemistry*, (10), pp. 1503–1509. (In Russ.)
- Melenevskii V.N., Leonova G.A., Konyshov A.S. (2011). The organic matter of the recent sediments of Lake Beloe, West Siberia (from data of pyrolytic studies). *Russ. Geol. Geophys.*, 52(6), pp. 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.002>
- Melnikov P.N., Skvorcov M.B., Kravchenko M.N., Agadzhanyc I.G., Grushevskaya O.V., Uvarova I.V. (2020). Geological exploration in the Arctic resource potential and promising areas. *Delovoy zhurnal Neftegaz.ru*, (1), pp. 22–30. (In Russ.)
- Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G., Mazzini A., Piatilova A., Bakay E., Dowdeswell J. A. (2023). The geomorphic record of marine-based ice dome decay: final collapse of the Barents Sea ice sheet. *Quaternary Science Reviews*, 303, 107973. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2023.107973>
- Morgunova I.P., Semenov P.B., Krylov A.A., Kursheva A.V., Litvinenko I.V., Malyshev S.A., Minami H., Hachikubo A., Zemskaya T.I., Hlystov, O.M. (2018). Hydrocarbon molecular markers in bottom sediments of zones of focused fluid discharge from Lake Baikal. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika = Petroleum Geology - Theoretical and Applied Studies*, 13(4), 40. (In Russ.) https://doi.org/10.17353/2070-5379/40_2018
- Murdaa I., Ivanova E., Duplessy J., Levitan M., Khusid T., Bourtman M., Alekhina G., Alekseeva T., Belousov M., Serova V. (2006). Facies system of the Eastern Barents Sea since the last glaciation to present. *Marine Geology*, 230(3–4), pp. 275–303. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2006.06.001>
- Nemirovskaya I.A., Hramcova A.V., Halikov I.S., Koltovskaja E.V., Solomatina A.S. (2021). Hydrocarbons in water and sediments of the Norwegian and Barents Seas. *Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, (4), pp. 94–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.17076/lim1382>
- Niemann H., Lösekann T., De Beer D., Elvert M., Nadalig T., Knittel K., Amann R., Sauter E.J., Schlüter M., Klages M., Foucher J.P., Boetius A. (2006). Novel microbial communities of the Haakon Mosby mud volcano and their role as a methane sink. *Nature*, 443(7113), pp. 854–858. <https://doi.org/10.1038/nature05227>
- Norina D.A. (2014). Structure and source potential of Permian-Triassic terrigenous deposits of the Barents Sea shelf. Cand. geol. and min. sci. diss.. Moscow: MSU, 208 p. (In Russ.)
- Peters K.E., Moldowan J.M. (1993). The biomarker guide. Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 363 p.
- Peters K.E., Walters C.C., Moldowan J.M. (2005). The Biomarker Guide: Biomarkers and isotopes in petroleum systems and Earth history. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1156 p.
- Petrov A.A. (1984). Petroleum hydrocarbons. Moscow: Nauka, 264 p. (In Russ.)
- Petrova V.I., Batova G.I., Kursheva A.V., Litvinenko I.V., Morgunova I.P. (2015). Hydrocarbons in the bottom sediments of the Shtokman area – distribution, genesis, time trends. *Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika = Petroleum Geology - Theoretical and Applied Studies*, 10(3), 35. (In Russ.) https://ngtp.ru/rub/1/35_2015.pdf
- Petuhov A.V. (1981). Comprehensive analysis of geochemical prospecting data for oil and gas fields. Moscow: Nedra, 262 p. (In Russ.)

Petuhov A.V., Starobinec I.S. (1993). Fundamentals of the theory of geochemical fields of hydrocarbon accumulations. Moscow: Nedra, 332 p. (In Russ.)

Polyak L., Solheim A. (1994). Late- and postglacial environments in the northern Barents Sea west of Franz Josef Land. *Polar Research*, 13(2), pp. 197–207. <https://doi.org/10.3402/polar.v13i2.6693>

Poshibayeva A.R. (2015). Nutrient biomass as a source of oil hydrocarbons. Cand. chem. sci. diss.. Moscow: Gubkin RSU of oil and gas, 124 p. (In Russ.)

Radke M., Welte D.H., Willsch H. (1986). Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons: Influence of the organic matter type. *Organic Geochemistry*, 10(1–3), pp. 51–63. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(86\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0146-6380(86)90008-2)

Rise L., Bellec V.K., Chand S., Bøe R. (2015). Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords. *Norwegian Journal of Geology*, 94(4), pp. 263–282. <https://doi.org/10.17850/njg94-4-02>

Senin B.V., Leonchik M.I., Osherova N.A. (2020). Raw material base of oil and gas production in the Barents Sea and perspective directions of its development. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, (6), pp. 21–31. (In Russ.)

Smirnov R.V. (2014). A revision of the Oligobrachiidae (Annelida: pogonophora), with notes on the morphology and distribution of *Oligobrachia haakonmosbiensis* Smirnov. *Marine Biology Research*, 10(10), pp. 972–982. <https://doi.org/10.1080/17451000.2013.872799>

Solovieva M.A., Vidishcheva O.N., Ahmanov G.G., Montelli A.I. (2020). Modern and paleo-fluid discharge in the northeastern part of the Barents Sea: geological and geophysical characteristics based on the results of TTR-19 cruise. *Proc. IX International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)"*. Moscow: OOO «PoliPRESS», pp. 83–85. (In Russ.)

Startseva, K.F., Nikishin, A.M., Malyshev, N.A. et al. (2017). Geological and geodynamic reconstruction of the East Barents megabasin from analysis of the 4-AR regional seismic profile. *Geotectonm*, 51, pp. 383–397. <https://doi.org/10.1134/S0016852117030104>

Stupakova A.V. (2011). Structure and petroleum potential of the Barents-Kara shelf and adjacent territories. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, (6), pp. 99–115. (In Russ.)

Stupakova A.V., Bolshakova M.A., Suslova A.A., Mordasova A.V., Osipov K.O., Kovalevskaja S.O., Kolesnikova T.O., Shevchenko G.A., Masterkov I.A., Cygankova A.A., Gil'mullina A.A. (2021). Generation potential, distribution area and maturity of the Barents-Kara Sea source rocks. *Georesursy = Georesources*, 23(2), pp. 6–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2021.2.1>

Tissot B.P., Welte D.H. (1978). Petroleum formation and occurrence. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 538 p.

Vidishcheva O., Poludetkina E., Basova E., Dralina E., Bogdanov A., Bakay E., Man'ko I., Akhmanov G., Mazzini A. (2022). Hydrocarbons investigations from near-surface sediments of the north and northeastern Barents Sea shelves. *EGU General Assembly 2022*, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-10172. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10172>

Villar H.J., Püttmann W., Wolf M. (1988). Organic geochemistry and petrography of Tertiary coals and carbonaceous shales from Argentina. *Organic geochemistry*, 13(4–6), pp. 1011–1021. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(88\)90283-5](https://doi.org/10.1016/0146-6380(88)90283-5)

Winsborrow M., Andreassen K., Hubbard A., Plaza-Faverola A., Gudlaugsson E., Patton H. (2016). Regulation of ice stream flow through subglacial formation of gas hydrates. *Nature Geoscience*, 9(5), pp. 370–374. <https://doi.org/10.1038/ngeo2696>

About the Authors

Lyubov Yu. Sigacheva – Master, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation
e-mail: sigacheva_l@list.ru

Olesya N. Vidishcheva – Cand Sci. (Geology and Mineralogy), Lead Engineer, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation;

Anton G. Kalmykov – Cand Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Elena N. Poludetkina – Cand Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Grigorii G. Akhmanov – Cand Sci. (Geology and Mineralogy); Associate Professor, Petroleum Geology Department, Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie gory, Moscow, 119234, Russian Federation

Manuscript received 13 September 2023;

Accepted 16 November 2023; Published 30 December 2023