

УДК 550.834.05, 550.812.14, 553.981

М.Ю. Токарев<sup>1</sup>, Е.Н. Полудеткина<sup>2</sup>, А.В. Старовойтов<sup>3</sup>, А.С. Пирогова<sup>4</sup>,  
С.Р. Корост<sup>5</sup>, А.Н. Ошкин<sup>6</sup>, А.К. Потемка<sup>7</sup>

## ХАРАКТЕРИСТИКА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ И ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ<sup>8</sup>

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет.  
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

Центр анализа сейсмических данных Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.  
119992, Ленинские Горы, д. 1, стр. 77

Центр морских исследований Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ).  
119992, г. Москва, Ленинские горы, вл. 1, стр. 77, Научный парк МГУ, офис 402

ООО «Сплит». 121205, г. Москва, Территория Сколково инновационного центра, Большой Бульвар,  
д. 42, стр. 1, эт. 4, пом. 1589

Moscow State University, Faculty of Geology. 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Moscow State University, Seismic Data Analysis Centre (MSU SDAC). 119992, Moscow, Leninskie Gory, 1, build. 77

Marine Research Center at Moscow State University (MRC LMSU). 119234, Moscow, Leninskiye Gory, 1, Nauchny Park, str. 77

Split LLC. Skolkovo Innovation Center. 121205, Moscow, Bolshoy Boulevard, Building 42, build. 1, fl. 4, room 1589

В статье рассматриваются результаты многолетних комплексных геолого-геофизических и геохимических исследований газонасыщенных осадков в пределах Кандалакшского залива Белого моря. В рамках изучения акватории проведены детальные сейсмоакустические исследования, в результате которых получена информация о геометрии морского дна, распространении особенностей геологического строения осадочного чехла, в том числе и зон фокусированной разгрузки углеводородных флюидов. Показано, что скопления «газовых шапок» приурочены к зонам накопления максимальных мощностей послеледниковых осадков. Детально изучен состав органического вещества осадков и газовой фазы.

**Ключевые слова:** Кандалакшский залив, Белое море, сейсмоакустика, газонасыщенные отложения, донный пробоотбор, геохимическая съемка, углеводородные газы.

The article discusses the results of complex geological, geophysical and geochemical studies of gas-saturated sediments within the Kandalaksha gulf, the White Sea. As a part of the marine study detailed seismoacoustic studies were conducted, resulting in the geometry of the seabed, the distribution of geological peculiarities of the sedimentary sequence, including the zones of focused unloading of hydrocarbon fluids. It is shown that assemblages of the «gas caps» are confined to the zones of maximal thickness of post-glacial sediments. The composition of the organic matter in the sediments and the gas phase has been studied in detail.

**Key words:** the Kandalaksha gulf, the White Sea, seismoacoustics, gas-saturated deposits, bottom sampling, geochemical survey, hydrocarbon gases.

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, вед. науч. с., канд. техн. н.; e-mail: mjtokarev@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии и геохимии нефти и газа, ст. науч. с., канд. геол.-минерал. н.; e-mail: poludetkinaelena@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, доцент, канд. геол.-минерал. н.; e-mail: starovoytov\_msu@mail.ru

<sup>4</sup> Центр анализа сейсмических данных Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ЦАСД МГУ), геофизик; e-mail: anastasya.pir@gmail.com

<sup>5</sup> Центр морских исследований Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), геолог; e-mail: korost\_sr@mail.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, ассистент, канд. физ.-мат. н.; e-mail: a.oshkin@gmail.com

<sup>7</sup> ООО «СПЛИТ», геофизик; e-mail: potemka.msu-sea@mail.ru

<sup>8</sup> Работа выполнена в рамках проекта «Разработка программно-аппаратных комплексов для поиска, разведки, геофизического и геохимического мониторинга разработки месторождений углеводородов, в т.ч. в труднодоступных регионах и сложных природно-климатических условиях» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Соглашение № 14.607.21.0187 от 26 сентября 2017 г. «О предоставлении субсидии». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60717X0187.

**Введение.** При изучении процессов осадконакопления на акваториях в последние годы большое внимание уделяется газонасыщенным осадкам. Они, как правило, залегают на ограниченных по площади участках (диаметр несколько десятков — несколько сотен метров, хотя есть примеры и огромных в плане участков — диаметр до нескольких километров и значительно больше); с ними часто связаны зоны аномально высокого пластового давления. В некоторых регионах наблюдаются выходы флюидов в водную толщу. Помимо чисто научных исследований, связанных, например, с изучением климатических изменений, газопроявления в морских бассейнах имеют и важное практическое значение при поисках залежей углеводородов, оценке экологического состояния акваторий, выборе мест установки буровых платформ и безопасного расположения скважин, прокладке подводных трубопроводов различного назначения, установке инженерных сооружений на морское дно, и т.д. В первую очередь это обусловлено тем, что газонасыщенные осадки являются индикатором зон разгрузки углеводородов из недр осадочного чехла, но также представляют одну из основных геологических опасностей, связанных с верхней частью разреза.

К основным методам для поиска газонасыщенных отложений при инженерно-геологических работах на акваториях относятся методы двумерного и трехмерного сейсмоакустического профилирования, а также гидролокации бокового обзора (ГБО). Наличие газов в осадках резко меняет их акустические свойства, что создает предпосылки для эффективного применения в первую очередь сейсмоакустических методов [Novland, Judd, 1988; Judd, Novland, 2007; Шалаева, Старовойтов, 2010]. При изучении неглубоко залегающих (придонных)

газонасыщенных осадков большое значение имеют также данные донного пробоотбора и последующие литолого-геохимические исследования состава осадков и газовой фазы в отобранных пробах.

В работах [Миронюк, Отто, 2014; Миронюк, 2015] приводится обширная библиография о газонасыщенных осадках верхней части разреза различных акваторий. В указанных работах с разной степенью детальности анализируется комплекс проблем, связанных с рассматриваемыми отложениями, — геоморфологических, структурных, литологических, тектонических, геохимических и т.д. Однако среди этих работ материалов о пространственном расположении участков газонасыщенных отложений, глубине их залегания, возрасте, а также генезисе газовой фазы немного. В условиях арктических морей это обусловлено тем, что объем сейсмоакустических исследований еще довольно мал.

В статье рассматриваются результаты многолетних детальных геолого-геофизических исследований в губе Ругозерская и проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря, что позволяет подробнее осветить некоторые из этих вопросов. Представляется также важным, что рассматриваемый район может служить модельным объектом при изучении особенностей процессов осадконакопления и газонасыщения в заливах и фиордах на шельфе западноарктических морей.

В 2018 г. в проливе Великая Салма были впервые проведены трехмерные высокочастотные многоканальные сейсмоакустические наблюдения по методу отраженных волн (3D МОВ), позволившие получить объемные изображения среды и уточнить пространственное положение объектов в верхней части разреза, в том числе зон с предположительно повышенным газонасыщением. Для



Рис. 1. Сейсмоакустические наблюдения с трехмерной (3D) системой на Белом море, НИС «Профессор Зенкевич»

верификации газонасыщенной природы выделенных сейсмоакустических аномалий в этих зонах выполнен пробоотбор гравитационными трубками до 3 м по грунту. На отобранных образцах керна проводились ультразвуковые измерения (100 кГц), литологические, томографические, инженерные исследования грунтов, битуминологические, пиролитические, геохимические исследования осадков и анализ углеводородного и неуглеводородного состава газовой фазы. Приводятся результаты комплексных геолого-геофизических исследований 2018 г., позволивших верифицировать и наиболее полно охарактеризовать приповерхностные газонасыщенные отложения в проливе Великая Салма.

**Аппаратура и методы исследования.** Работы в акватории Белого моря велись в июне-июле 2018 г. с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Зенкевич» с мобилизацией и демобилизацией в порту Причал Беломорской биостанции (ББС) МГУ имени Н.А. Перцова.

Начиная с 2003 г. основной объем сейсмоакустических наблюдений был выполнен с двумя типами источников: электроискровым спаркером и электродинамическим бумером. Частотный состав возбуждаемых колебаний менялся от нескольких сотен герц до 3500 Гц. Работы выполнялись в двух методических вариантах: приповерхностном, когда источник и приемник находились на согласованной глубине [Калинин и др., 1983], и заглубленном [Токарев, Пирогова, 2015]. Разрешающая способность по вертикали менялась от нескольких десятков сантиметров до 1,0–1,5 м. Большая часть материалов была получена с многоканальной косой, состоящей из 16 приемников, расположенных с шагом 2 м и длиной косы 32 м. Расстояние между профилями, как правило, не превышало 100 м. Всего по таким методикам выполнено около 500 профилей. В 2018 г. впервые проведены наблюдения с использованием трехмерной сейсмоакустической системы, состоящей из 4-х аналоговых пьезокос длиной 32 м и двух электроискровых источников (спаркеров), буксируемых около поверхности воды на глубине около 1–1,5 м (рис. 1). Проектное расстояние между буксируемыми косами составляло 4 м. При этом источники буксировались на уровне первого приемного канала 1-й и 4-й пьезокос соответственно и возбуждали колебания попеременно с небольшой временной задержкой один относительно другого. Такой режим работы позволил достичь оптимальной кратности наблюдений по профилю. Трехмерные сейсмоакустические данные получены на двух полигонах: в глубоководной части пролива Великая Салма за мысом Киндо и в более мелководной части акватории вблизи о. Оленевский. Принципиальная схема использованных геофизических данных и выделенных по ним зон распространения газонасыщенных осадков показана на рис. 2.

По результатам интерпретации данных сейсмоакустических исследований были составлены карты положения кровли газосодержащих осадков относительно дна. Из-за физической невозможности отбора керна с глубины, превышающей 3 м (максимальная глубина проникновения гравитационной трубки), для получения образцов керна, содержащих газонасыщенные осадки, выбирали участки полигонов с минимальной глубиной газонасыщенного осадка. Для сравнения и контроля часть образцов керна отбирали за пределами газосодержащих зон.

Геологическая заверка данных сейсмоакустического профилирования, отбор проб придонных вод и газонасыщенных осадков проводились прямым геологическим опробованием с помощью прямоточной гравитационной стальной трубы. Использовалась гравитационная трубка длиной 3 м, наружным диаметром 127 мм и массой 400 кг. Методом донного опробования изучено 52 станции, из которых 16 станций без вскрытия сразу были упакованы для дальнейших ультразвуковых (УЗИ) и томографических (КТ) исследований в стационарных лабораториях.

Непосредственно после извлечения керна из вкладыша трубки на палубе измеряли температуру осадка, Eh и pH осадков по колонке, а также проводилось опробование осадка для дальнейших геохимических исследований.

Для определения газогеохимического фона изученных осадков, а также выявления зон аномального содержания УВ в газах выполнены газохроматографические исследования 150 образцов газов, выделенных из осадков 25 колонок методами Head Space и термовакuumной дегазации на портативном хроматографе «Газохром 2000» и стационарном хроматографе «Кристаллолюкс-4000М». Образцы отобраны из разных интервалов разреза, характеризующих верхнюю (0–40 см), среднюю (50–150 см) и нижнюю (более 150 см) части разреза в объеме алевропелитовых–пелитовых осадков. В ряде образцов определен изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) на масс-спектрометре изотопных отношений «Delta V Advantage» («Finnigan», Бремен, Германия) с пробоподготовкой на линии «GC Isolink», включающей газовый хроматограф «Trace GC Ultra» и приставку «Isolink» с окислительным реактором.

Параллельно с отбором образцов на газовую фазу проведен отбор осадков для изучения углеводородного состава органического вещества.

Ультразвуковые исследования выполнены на всех типах грунтов при помощи судового комплекса «SplitVelocityMeter». Использована методика прямого просвечивания керна в стационарной лаборатории. Излучатель и приемник располагались на противоположных сторонах трубки на ее оси.

Компьютерная томография (КТ) полноразмерных образцов керна проводилась с помощью

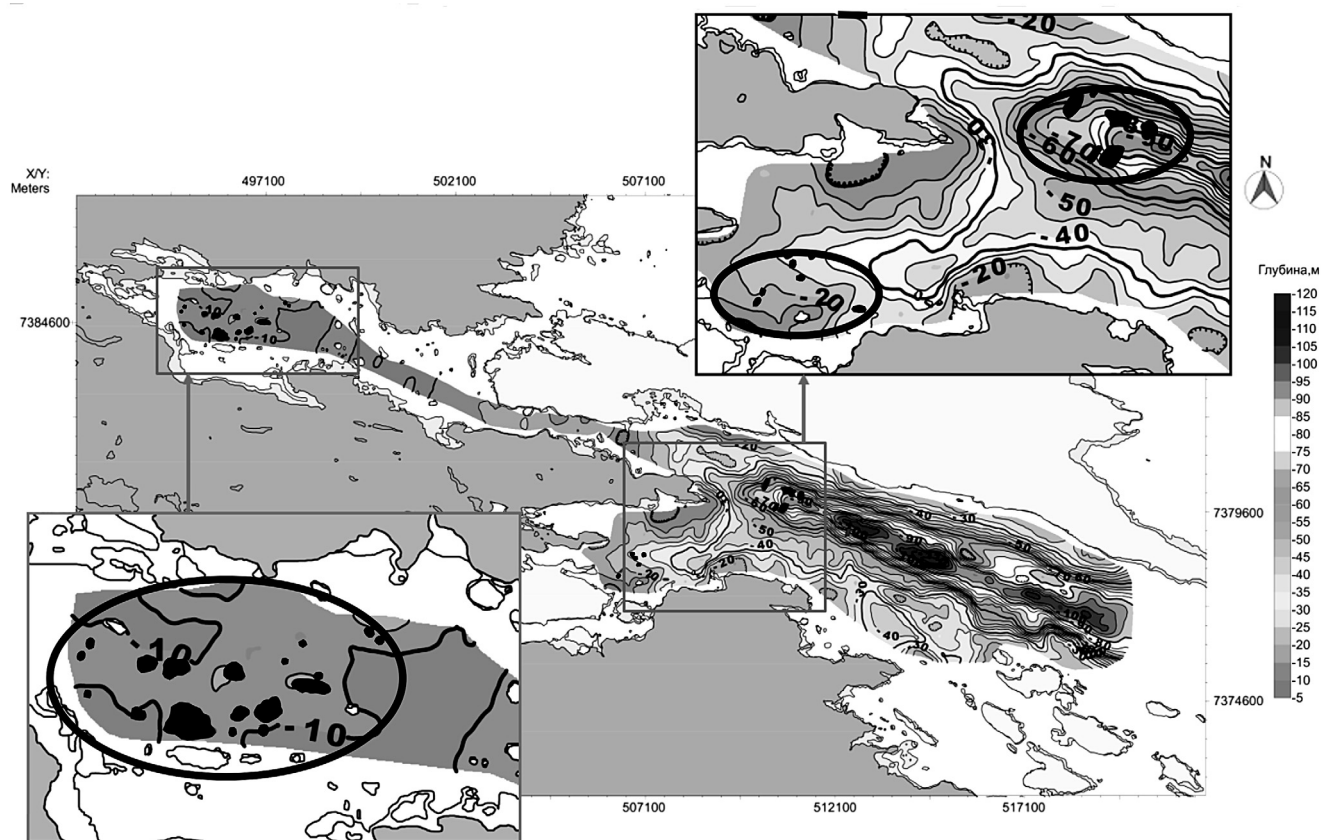


Рис. 2. Схема фактического материала. Черными точками показаны участки расположения газонасыщенных осадков

томографа РКТ-180-1 в стационарной лаборатории. Результаты съемки позволили получить трехмерное распределение значений рентгеновского поглощения всего объема образца в пределах разрешающей способности прибора. На получаемых рентгеноплотностных картинах выявлены рентгеноконтрастные элементы, различающиеся по плотности и химическому составу — поры, каверны, трещины, включения тяжелых минералов, прослой разного состава и пр.; а также проведено исследование текстурных и структурных особенностей неконсолидированных донных осадков.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Схема использованных в статье геофизических данных и участков расположения газонасыщенных осадков

показана на рис. 2. Признаки выделения газонасыщенных отложений по данным сейсмоакустики неоднократно опубликованы, поэтому приведем здесь примеры этих осадков, полученных разными методиками в изученных районах.

Признаки, по которым предположительно выделены газонасыщенные осадки, следующие: резкое увеличение амплитуды (аномалия типа «яркое пятно»), уменьшение амплитуды отражений под газонасыщенными отложениями вследствие поглощения в первую очередь волн высокой частоты под ними, прогибание осей синфазности отраженных волн под «ярким пятном», обусловленное уменьшением скорости продольных волн в осадках [Judd, Novland, 2007; Шалаева, Старо-

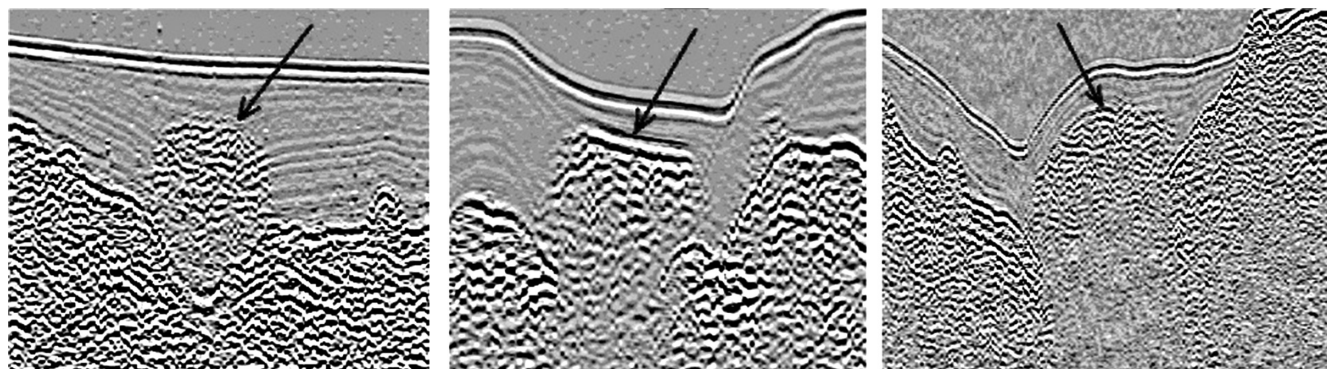


Рис. 3. Примеры волновых картин на сейсмической записи, характерных для газонасыщенных придонных осадков в районе исследования (черные стрелки)



Рис. 4. Фрагмент керна (станция WS18-14G, глубина 230–250 см) с текстурами выхода газа

войтов, 2010; Миронюк, Отто, 2014]. Аналогичные признаки газонасыщенных отложений отмечаются и на сейсмоакустических профилях, полученных с помощью электроискрового источника. На рис. 3 приведены три фрагмента профилей с примерами волновых картин «яркое пятно», «скоростной эффект», уменьшение амплитуды вплоть до полного экранирования под «яркими пятнами» (справа). Анализ кинематики продольных волн, а также анализ поведения амплитуды волны, отраженной от кровли газонасыщенных пластов, с углом падения позволяет оценить скорость распространения продольной волны в газонасыщенных пластах [Токарев, Пирогова, 2015]. В среднем для газонасыщенных осадков верхней части разреза в районе исследования характерны anomalously низкие значения скорости в диапазоне от 500 до 800 м/с.

Установлено, что газовые шапки сосредоточены в 3 районах: на северо-востоке от о. Оленевский; на севере от о. Высокий; на юге от о. Великий, в центральной части пролива Великая Салма.

Максимальные размеры площади аномалий характерны для отложений второго района, а наибольшие глубины кровли газонасыщенных осадков (до 94 м) — для третьего. На сейсмоакустических разрезах обнаружено более 30 аномальных участков, идентифицируемых как газонасыщенные отложения.

Удалось установить, что «газовые шапки» распределены по исследуемому полигону неравномерно. Их скопления приурочены к понижениям кровли фундамента, где в условиях спокойной гидродинамической обстановки сформировалась большая мощность послеледниковых осадков. Такие условия благоприятны для жизнедеятельности организмов и сохранности их остатков. Можно предположить, что для осадков, насыщенных газом в рассматриваемой части Кандалакшского залива, характерно биогенное происхождение. Основанием для такого предположения служит закономер-

ность распределения аномалий на исследуемой площади. Также наблюдается близость положения аномальных зон к тектоническим нарушениям в разрезе. Минимальная глубина залегания «газовых шапок» составляет около 1–2 м от поверхности дна акватории. При этом большинство оконтуренных газовых шапок расположено над зонами микрограбенов, ограниченных глубинными разрывными нарушениями.

Детальное литологическое расчленение разреза в пределах зон газонасыщенных осадков показало его однотипность. В самой кровле вскрытой части разреза выделяется тонкий прослой (толщина 2–3 см, редко до 5 см) желтовато-коричневого окисленного алевропелитового ила сметанообразной консистенции. Нижняя часть вскрытого разреза (толщина 175–285 см) также сложена алевропелитовым, пелитово-алевритовым илом, но характеризуется резким изменением окраски до черной. Черный цвет осадков обусловлен высоким содержанием гидротроилита, который возникает в осадках при взаимодействии гидроксида железа со свободным сероводородом, — продуктом метаболизма сульфатредуцирующих бактерий. Эта часть разреза находится в восстановительных условиях.

При набортном литологическом описании осадков отмечен резкий запах сероводорода, фиксировалось вскипание осадка. Отмечены также многочисленные текстуры выхода газа в виде трещинок и пузырьков (рис. 4). В целом из-за высокой газонасыщенности осадок имел мусообразную консистенцию.

По данным гранулометрического анализа в составе осадков вскрытой части разреза преобладают частицы алевритовой размерности (60–70%), в подчиненном количестве присутствуют частицы пелитовой размерности (30–40%). Пелитовый компонент осадков представлен преимущественно глинистыми минералами, в составе которых доминируют гидрослюда. В составе обломочного

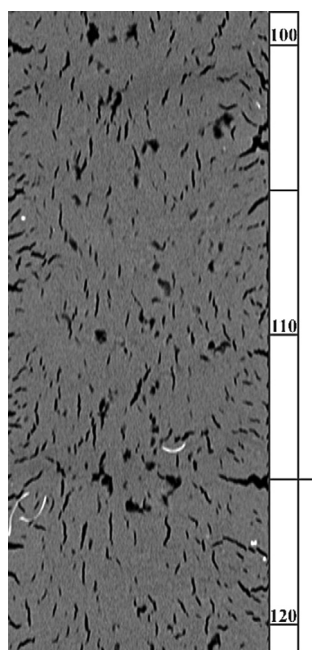


Рис. 5. Фрагмент рентгеноплотностного среза (станция WS18-41G, глубина 100–120 см). Серое — осадки, черное — полые трещины, обусловленные дегазацией осадка

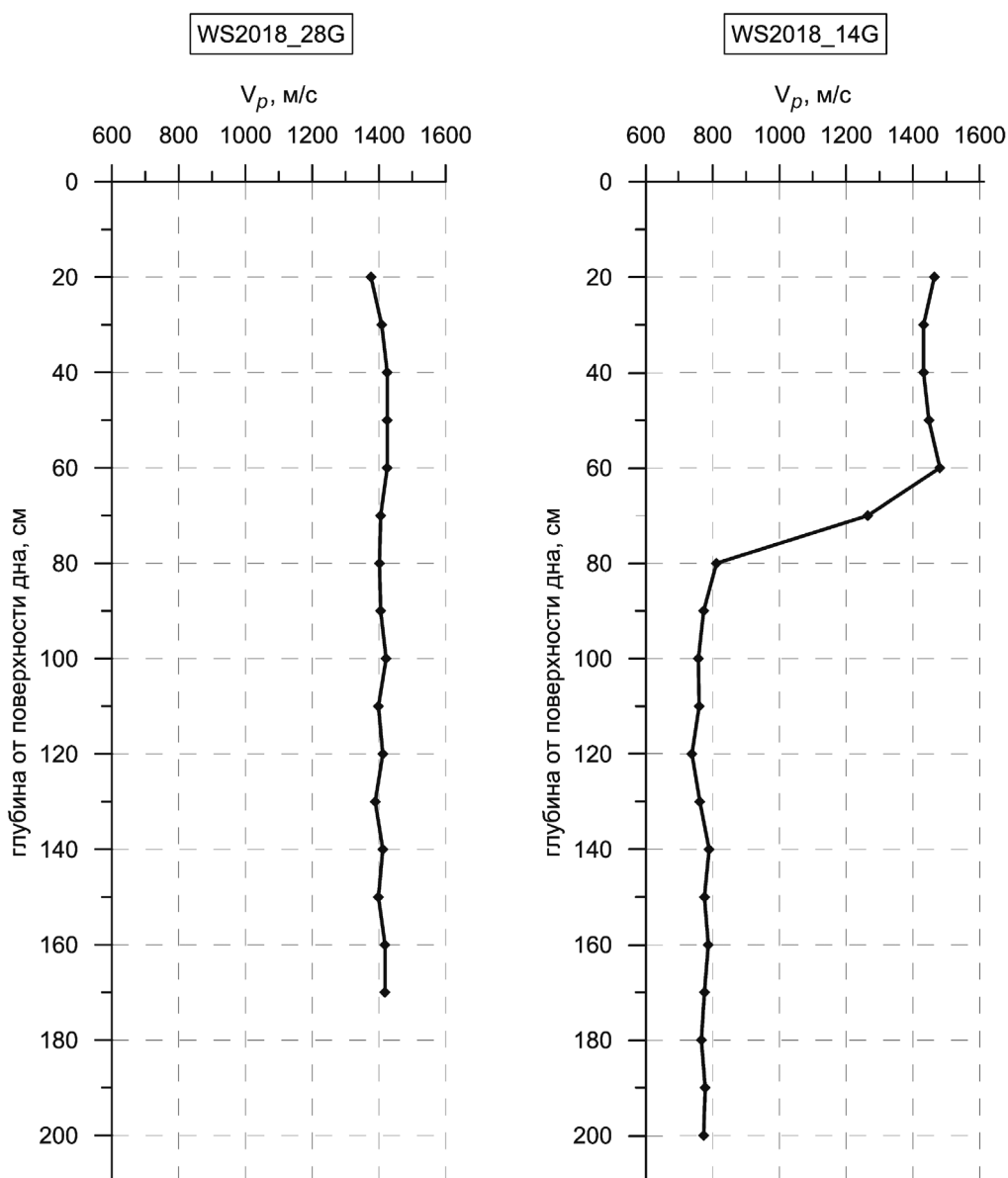


Рис. 6. Кривые скорости продольной волны  $V_p$  для колонок ядра с газонасыщенными интервалами (WS2018\_41G) и не насыщенными газом (WS2018\_45G)

компонента осадков преобладают кварц, плагиоклаз, микроклин, роговая обманка, биотит, гранат, обломки магматических и осадочных пород. Такое распределение минерального состава осадков обусловлено составом магматических и метаморфических пород, слагающих скальные берега Кандалакшского залива.

Томографические исследования показали значительную неоднородность разреза, связанную прежде всего с высокой загазованностью верхней части разреза. На рис. 5 представлен фрагмент рентгеноплотностного среза газонасыщенных осадков, на котором видно, что осадок имеет неоднородное строение. Неоднородность обусловлена наличием многочисленных полых трещин субвертикальной ориентировки. Вниз по разрезу отмечено уменьшение размера и увеличение количества трещин. Наличие таких текстур вторично и обусловлено дегазацией осадка.

Результаты измерений значений скорости упругих волн вдоль образцов ядра представлены на рис. 6. Для каждого образца ядра все кривые скорости, полученные при измерениях в разные дни, собраны на одном графике, цифры обозначают день и месяц проведения измерения. Первое измерение было выполнено на борту судна, последующие — в стационарной лаборатории на территории базы. Для всех образцов отмечено резкое снижение скоростей  $V_p$  до 700–800 м/с на участках газосодержащих осадков, что представляет собой надежный признак для их выявления. Для большинства образцов выявлены пониженные значения скорости  $V_p$  для первого измерения по сравнению с последующими. Наиболее вероятным образом этот факт можно объяснить, предположив, что нарушены связи между частицами неконсолидированного осадка при расположении образца в горизонтальной плоскости. При таком размеще-

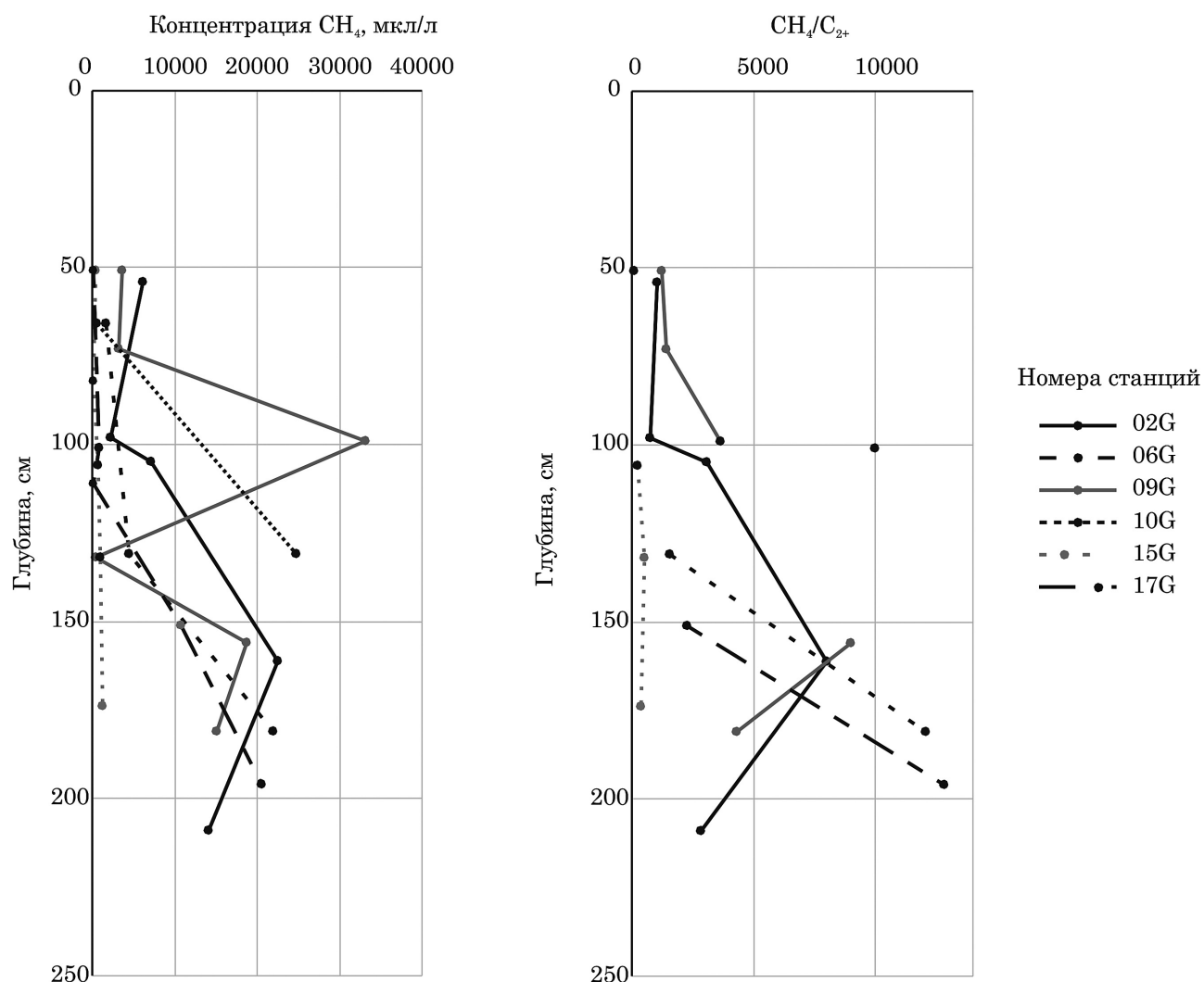


Рис. 7. Результаты газохроматографического анализа УВ

нии происходит разгрузка осадка и как следствие уменьшаются связи между частицами среды.

Анализ состава газовой фазы показал, что в ней преобладает метан. Его концентрация изменяется от нескольких микролитров до 779 мл/л. Максимальные значения концентрации метана (более 15 000 мкл/л) наблюдаются в нижней части разреза на глубине более 150 см. В пределах верхней части разреза (до 70 см) значения концентрации не превышают 6000 мкл/л. Уменьшение концентрации метана и вообще углеводородов (УВ) можно объяснить уменьшением сорбционной способности осадков вверх по разрезу, уменьшением их плотности и увеличением способности к десорбции, а также значительными потерями УВ при извлечении керна. Отметим присутствие в газовой фазе тяжелых гомологов вплоть до пентана в малой концентрации. Присутствуют этан (максимально 1,5 мкл/л), этен (до 2,3 мкл/л); пропан (максимально 5,6 мкл/л), бутан (до 1,7 мкл/л), пентан (несколько микролитров на литр). Общепринято, что микробиально могут образовываться только простейшие молекулы — метан и этан в незна-

чительных количествах. Для большинства исследованных образцов отношение  $\text{C}_1/(\text{C}_2+)$  больше 1000 (рис. 7), что характеризует изученный газ как биогенный, что, впрочем, неудивительно, так как термогенный УВ флюид не может присутствовать в данных геологических условиях, при отсутствии условий для нефтегазогенерации, а именно при отсутствии достаточно мощного осадочного чехла и температуры, необходимой для процессов термического крекинга органического вещества. Однако для ряда образцов этот коэффициент значительно меньше (3–88). Вероятно, в осадках Белого моря происходят процессы анаэробного разложения жирных кислот до высокомолекулярных газов  $\text{C}_3\text{--C}_5$  в незначительном количестве [Лисицын, Немировская, 2017].

Наряду с углеводородными газами в осадках содержатся углекислый газ и азот в концентрации, часто превышающей концентрацию в воздухе (об.%) ( $\text{CO}_2$  — до 84,  $\text{O}_2$  — до 17,  $\text{N}_2$  — от 4,5 до 95,5). При этом повышенная концентрация азота обнаружена в осадках станций с максимальным содержанием гомологов метана и с минимальным



углекислого газа (0,07–0,1 об.%). Азот может иметь как атмосферный, так и глубинный источник, что может объяснять повышенную фоновую концентрацию азота на станциях WS18\_01G, WS18\_13G, WS18\_24G и других, отобранных в зоне ярких сейсмических аномалий, находящихся в пределах зон крупных разломов.

Выполненные изотопные исследования показывают, что изотопные отношения углерода в  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  образуют тренд от наиболее легких изотопных отношений газовой фазы, выделенной из осадков колонки 10G (в которой отсутствуют гомологи метана выше этана) до наиболее тяжелых — в колонке 09G. Наблюдаемый тренд попадает на линию смещения изотопного состава углерода глубинного газа и газа, связанного с процессами микробного окисления. Таким

образом, можно предположить, что смещение изотопного состава углерода исследованных газовых проб в область более тяжелого изотопного отношения углерода обусловлено смешением флюидов разного генезиса.

**Заключение.** В результате детальных геолого-геофизических исследований акватории Кандалакшского залива Белого моря оконтурены зоны газонасыщения. Показано, что скопления «газовых шапок» приурочены к понижениям кровли фундамента, где в условиях спокойной гидродинамической обстановки образовались послеледниковые осадки большой мощности. Такие условия благоприятны для жизнедеятельности организмов и сохранности их остатков. Для газовой фазы определено преимущественно биогенное происхождение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лисицын А.П., Немировская И.А., Шевченко В.П., Воронцова В.Г. Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. 1048 с.

Маштаков А.С. Оценка комплексного влияния на несущую способность грунтов циклических воздействий и мелкозалегающего свободного газа // Междунар. науч. журн. «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2013. № 11 (133). С. 33–36.

Миронюк С.Г. Учет палеогеографических условий при выполнении инженерных изысканий на шельфе западного сектора Российской Арктики // Инженерно-геологические изыскания. 2015. № 7. С. 28–38.

Миронюк С.Г., Отто В.П. Газонасыщенные морские грунты и естественные газовыделения углеводородов: закономерности распространения и опасность для инженерных сооружений // Геориск. 2014. № 2. С. 8–18.

Токарев М.Ю., Пирогова А.С. Определение упругих свойств газонасыщенных осадков по данным сверхвысокоскоростных сейсмоакустических наблюдений с заглубленной системой. Кандалакшский залив, Белое море // Технологии сейсморазведки. 2015. № 3. С. 66–74.

Шалаева Н.В., Старовойтов А.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. С. 256.

Hovland M., Judd A.G. Seabed Pockmarks and Seapages // Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Graham&Trotman, 1988. P. 295.

Judd A.G., Hovland M. Seabed fluid flow // The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. N.Y.: Published in the United States of America by Cambridge University Press, 2007. 475 p.

Поступила в редакцию 11.12.2018

Поступила с доработки 20.02.2019

Подписано в печать 25.02.2019