

УДК 551.24+552.578.1

## ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕГАЗАЦИИ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА ПЕЧОРСКОГО МОРЯ И ЕЕ СВЯЗЬ С ТЕКТОНИКОЙ

© 2021 г. С. Ю. Соколов<sup>1,\*</sup>, Е. А. Мороз<sup>1</sup>, Г. Д. Агранов<sup>1,3</sup>, Е. А. Сухих<sup>1</sup>, Р. А. Ананьев<sup>2</sup>,  
А. А. Разумовский<sup>1</sup>, О. В. Левченко<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН К.Е. Дегтяревым 13.04.2021 г.

Поступило 13.04.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принято к публикации 30.04.2021 г.

Проанализировано пространственное распределение приповерхностных сейсмоакустических аномалий типа “яркое пятно” в Печорском море, являющихся индикаторами скопления свободного газа. Аномалии связаны с разломными зонами, нарушающими палеозойские, и в ряде случаев, мезозойские осадочные комплексы, по которым происходит миграция газонасыщенных флюидов вверх до четвертичных отложений, в которых и наблюдается исследованное явление. При нарушении стабильности приповерхностных скоплений прорывы газа в водную толщу имеют опасные последствия для техногенной деятельности на акватории шельфа. Газонасыщенные области осадков проявлены в пространстве дискретно как по горизонтали, так и по вертикали. Обеспечение безопасной деятельности человека на Арктических шельфах требует детального изучения проявлений дегазации.

*Ключевые слова:* глубинная дегазация, Печорское море, сейсмоакустические аномалии, “яркое пятно”, тектонические разломы

**DOI:** 10.31857/S268673972108017X

Исследования сейсмоакустических аномалий, потенциально связанных со скоплениями свободного газа в верхней части разреза осадков Печорского моря, были проведены авторами во время экспедиций Геологического института РАН и Института океанологии РАН в 38-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2018 г. по системе полигонных и маршрутных галсов и продолжены в 41-м (2019 г.) и 49-м (2020 г.) рейсах [8, 9, 14]. Для Печорского моря характерна высокая степень изученности сейсмоакустическими методами. В ходе этих исследований установлены факты газонасыщенности в слабоконсолидированных породах верхней части разреза [5–7, 10]. Скопления свободного газа приурочены преимущественно к зонам мерзлоты в области глубин моря 50–70 метров и мельче. Сопоставление данных сейсмоакустической съемки высокого разрешения с данными глубинной сейсморазведки пока-

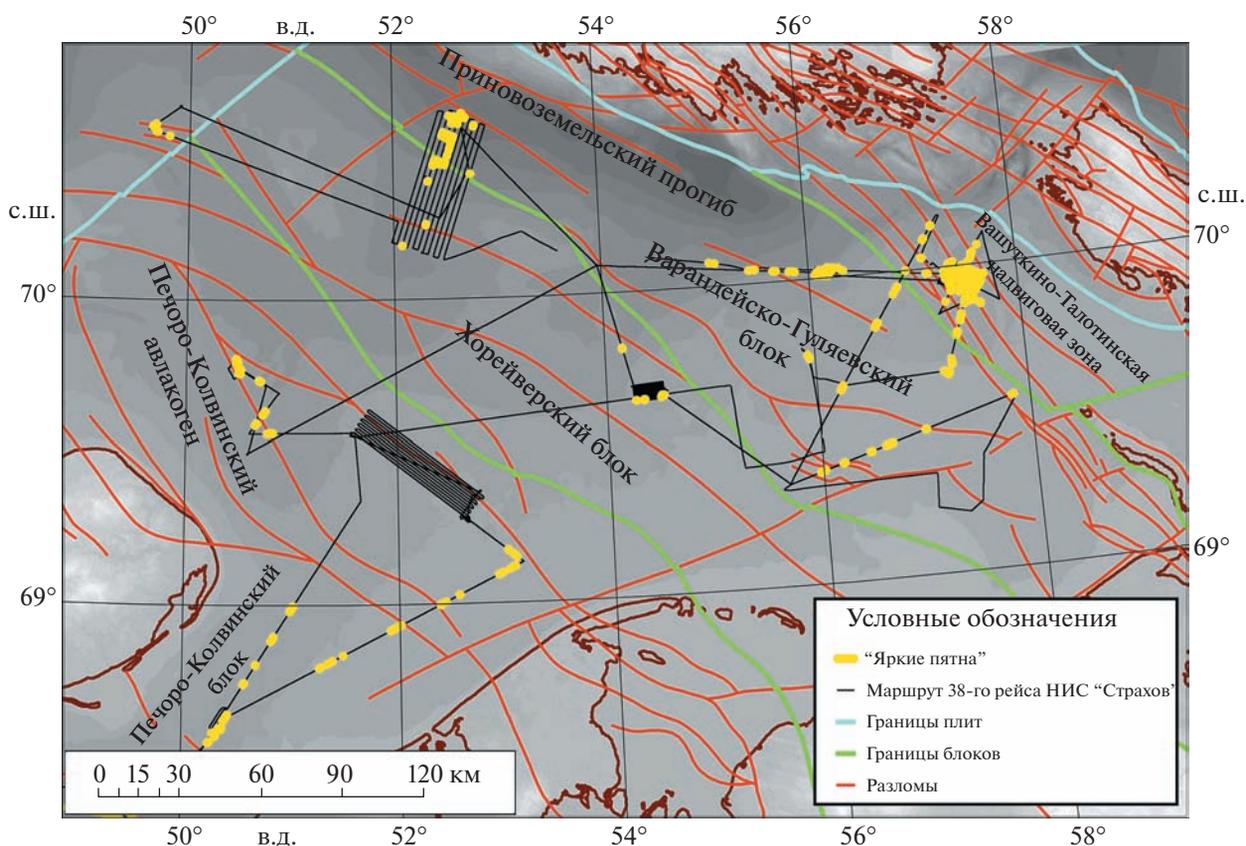
зало [14], что свободный газ сначала аккумулируется под подошвой глинистых толщ юрского возраста на глубинах от 400 до 700 м, поступая из триасовых комплексов. Локальные нарушения флюидоупора при тектонических смещениях приводят к дальнейшему подъему газа в четвертичные отложения и формированию приповерхностных скоплений, из которых, при деградации мерзлоты и механических процессах нарушения целостности пород, происходят выбросы в водную толщу из приповерхностных скоплений. Эти выбросы обнаруживаются в виде аномалий типа “яркое пятно” на сейсмоакустической записи и звукорассеивающих объектов над дном. Было показано, что эти аномалии часто расположены над разломными зонами. Разгрузка газов в водную толщу из триасовых комплексов также была обнаружена в северном обрамлении Баренцева моря в 25-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” [13] в областях с отсутствием юрского флюидоупора. Газовые скопления на небольшой глубине под дном и их прорыв в водную толщу, в пределах Арктических шельфов России, представляют опасность для инженерной и навигационной деятельности. Систематическое картирование этого явления является необходимым элементом при подготовке района к промышленной эксплуатации. В настоящей статье представлены

<sup>1</sup> Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт океанологии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Музей землеведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: sysokolov@yandex.ru



**Рис. 1.** Пространственное распределение сейсмоакустических аномалий типа “яркое пятно” в Печорском море по данным 38-го рейса НИС “Академик Николай Страхов”. Элементы тектоники района показаны по данным [3].

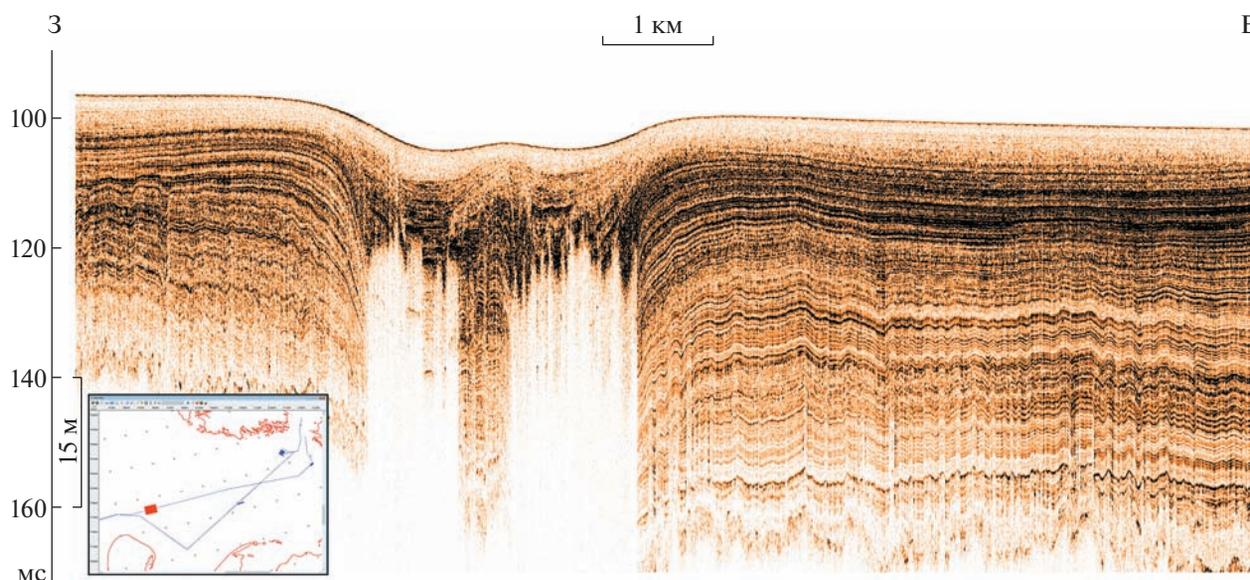
результаты выделения и интерпретации всех аномалий типа “яркое пятно” по данным 38-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” в пределах акватории Печорского моря (рис. 1). Сбор данных был осуществлен профилографом EdgeTech 3300 с сигналом типа CHIRP в диапазоне частот от 2 до 12 кГц.

Пространственное распределение аномалий типа “яркое пятно” в Печорском море показывает наличие нескольких компактных групп, которые расположены в разных структурных блоках в пределах маршрута судна (см. рис. 1). Восточная группа аномалий сосредоточена в Вашуткино-Талотинской надвиговой зоне [14], где по данным [11] к уровню подошвы мезозойских комплексов по разломам могут быть подняты ордовикские соли. В этой зоне существует благоприятная обстановка для миграции флюидов по эшелонированной системе взросов, которые, при проникновении в верхнюю часть разреза осадков в первые десятки метров под дном моря, формируют скопления, проявленные в разрезах в виде “ярких пятен”. Прорывы газа из таких скоплений могут представлять непосредственную опасность [1, 2]. Кроме поступления глубинных газонасыщенных флюидов по разломам, могут существовать и дру-

гие источники газов, например приповерхностные биогенные, но в нашей работе мы рассматриваем газопроявление в данных сейсмоакустики только в сравнении с тектоническим фактором.

Варандей-Гуляевский блок, на северо-западе которого расположен Приновоземельский прогиб (см. рис. 1), характеризуется еще одной компактной группой газовых аномалий записи. Практически все маршрутные разрезы между полигонами содержат “яркие пятна”. Мощность триасовых комплексов в этом блоке по данным [4] больше, чем на западе Печорского моря. Тектоническая раздробленность блока по данным [3] и разрезы МОВ ОГТ [14], содержащие аномалии записи в подошве мезозойских комплексов, подтверждают связь газовых аномалий в верхней части разреза с глубинными источниками в Варандей-Гуляевском блоке. “Яркие пятна” в Приновоземельском прогибе (рис. 1) могут быть связаны с повышенной трещиноватостью в разрезе из-за близости к фронтальной части надвиговой системы, проявленной взросами и структурами сжатия [4].

Хорейверский блок отличается наименьшей встречаемостью акустических аномалий (рис. 1).



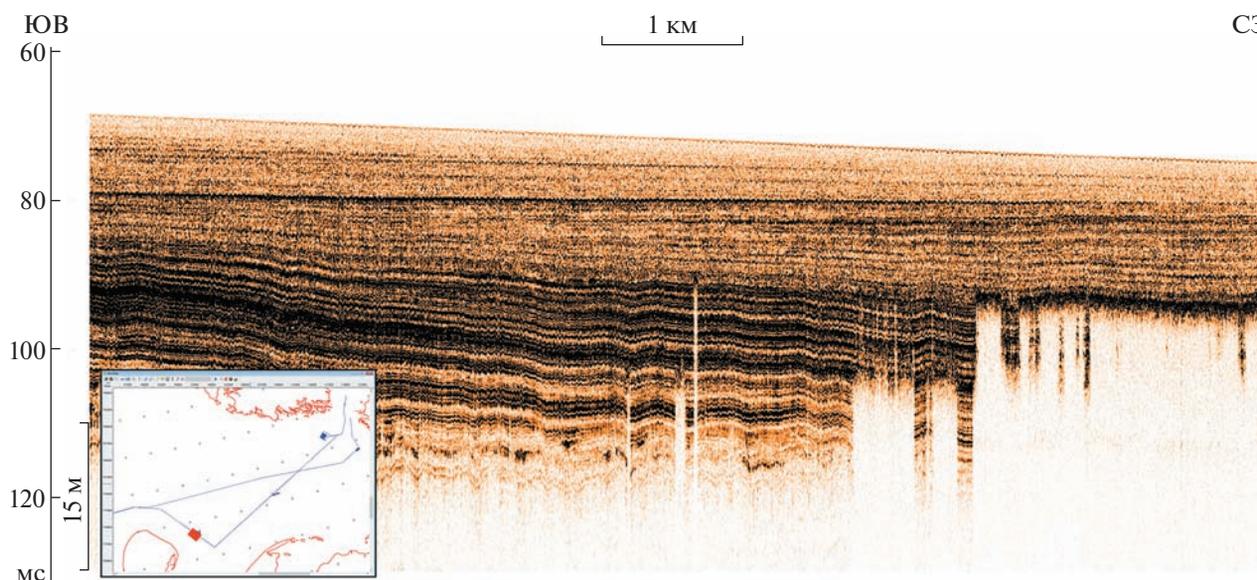
**Рис. 2.** Субширотный разрез четвертичных осадков в Печоро-Колвинском авлакогене по данным 49-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ИО РАН, ГИН РАН, 2020), полученный профилографом с сигналом CHIRP в диапазоне частот 2–12 кГц (положение разреза показано на врезке).

Его фундамент согласно [3, 4] сложен относительно жестким массивом земной коры, являющимся стабильной антиформой древней платформы. Тектоническая раздробленность проявлена меньше всего, что, по всей видимости, является причиной минимального распространения “ярких пятен”, маркирующих газовые скопления. По данным [14] в северной части блока на границе с Мурманско-Куренцовским блоком проявлены интенсивные акустические аномалии, расположенные в депрессии амплитудой в первые десятки метров. Они могут быть интерпретированы как скопления свободного газа в отложениях палеорусел [6]. Другим вариантом интерпретации их генезиса является связь с растворением и последующим обрушением (коллапсом) кровли соляного диапира, которое согласно [12] теоретически может иметь место в данном районе, если допустить распространение ордовикских соляных отложений на запад от Варандейско-Гуляевского блока.

К юго-востоку от о. Колгуев в Печоро-Колвинском блоке проявлена плотная группа аномалий (см. рис. 1), связанная с локальными тектоническими нарушениями. В восточной части этой группы аномалии сконцентрированы около разломных зон и субмеридионального Колвинского мегавала. Отдельной группой выделяются аномалии в центральной части Печоро-Колвинского авлакогена, также сконцентрированные около разломной зоны (см. рис. 1). В 49-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” для исследования этой группы были заложены дополнительные галсы. На субширотном разрезе четвертич-

ных осадков, пересекающем разломную зону (рис. 2), выделяется депрессия глубиной до 10 м и шириной до 2 км, имеющая также небольшое центральное поднятие. Морфология дна и характер проседания рефлекторов по краям депрессии аналогичны аномалиям, связанным с процессами над соляными протрузиями [12]. По периферии депрессии наблюдаются широкие вертикальные акустические осветления записи, разделяющиеся в верхней части на так называемые “трубы” шириной около 50 м. Эта форма записи связана с поступающим вверх по разрезу газонасыщенным флюидом, который в приповерхностной части скапливается в небольших локальных ловушках, образуя в волновом поле субгоризонтальные аномалии типа “яркое пятно” с увеличенной по сравнению с окружающими рефлекторами интенсивностью отраженного сигнала. Под эти аномалии высокочастотный сигнал проходит с резкой потерей энергии и практически не позволяет получить отражения в среде с первичной литологической структурой, нарушенной процессами дегазации и флюидопотоком.

Выклинивание рефлекторов на западном фланге депрессии на глубине около 12 м под дном показывает, что выброс газонасыщенного флюида мог проходить в два этапа. Сформированное на первом этапе проседание было засыпано осадочным материалом с несогласным залегаем на бортах депрессии, которая при повторном выносе флюида с осадочным материалом к поверхности просела уже вместе с несогласно залегающим комплексом. На восточном борту такого не наблюдается (см. рис. 2). Это может указывать на то,



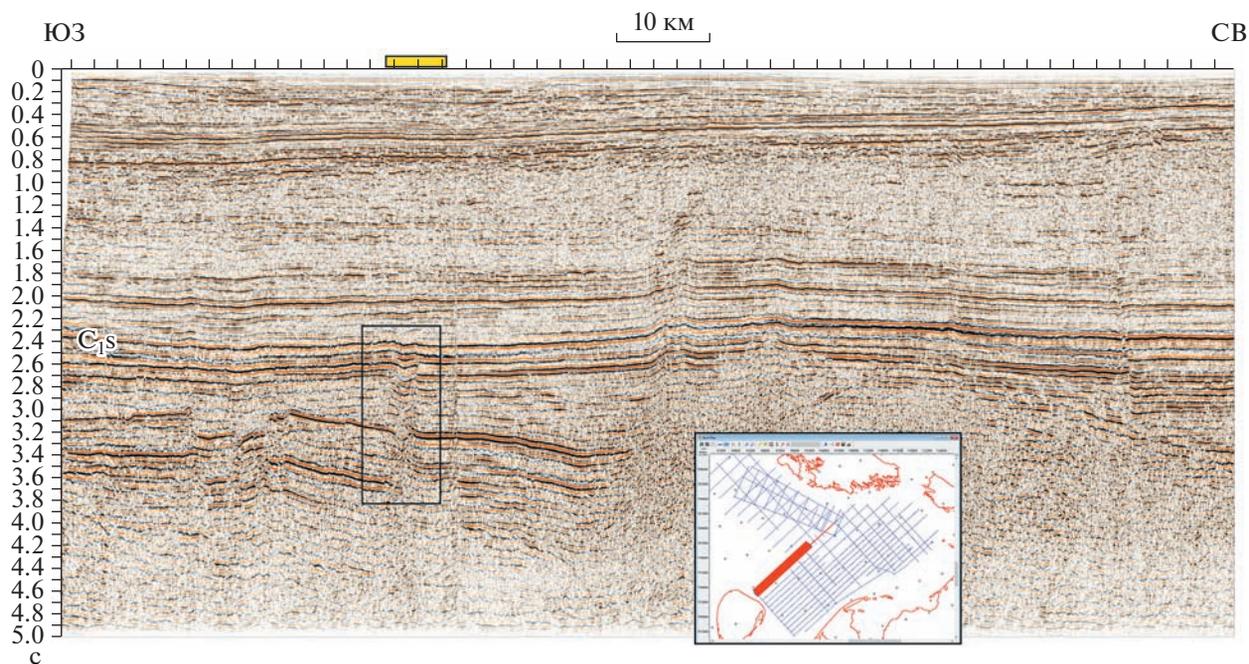
**Рис. 3.** Субмеридиональный разрез четвертичных осадков в Печоро-Колвинском авлакогене по данным 49-го рейса НИС “Академик Николай Страхов” (ИО РАН, ГИН РАН, 2020), полученный профилографом с сигналом CHIRP в диапазоне частот 2–12 кГц (положение разреза показано на врезке).

что повторный выброс проходил в западной части депрессии и таким образом сформировал в ней сложную хаотичную структуру рефлекторов. Положение депрессии над разломом указывает на возможность постоянного притока флюидов вверх по разрезу и вероятность новых выбросов газа в водную толщу. На образцах повторных разрезов над “яркими пятнами” в море Лаптевых по данным [16] видно, что скорость продвижения газовых фронтов, создающих эти аномалии сейсмоакустической записи в приповерхностных слабоконсолидированных осадках, может составлять от 2 до 8 м в год. Эти значения очень велики и указывают на необходимость картирования подобных зон с проведением обязательных повторных замеров на наиболее опасных участках шельфа.

Разрез вдоль разломной зоны Печоро-Колвинского авлакогена (рис. 3) показывает, что вдоль нее существует газовый фронт, выраженный протяженной аномалией “яркое пятно”, становящейся непрерывной по мере приближения разреза к разлому. Отдельные газовые “трубы” шириной от 5 до 50 м около разлома сливаются в единую область акустического осветления записи, продолжающуюся на север авлакогена. Подъем газонасыщенных флюидов в рыхлых осадках носит дискретный характер и стремится к объединению в единый фронт по мере приближения к интенсивному глубинному источнику. Отметим, что головные части “труб” и “яркие пятна”, являющиеся кровлей скоплений газа, в вертикальном измерении также расположены на дискретных глубинах около отметок 90, 100 и 104 мс

(см. рис. 3). Это, вероятно, указывает, что горизонты на этих глубинах обладают меньшей проницаемостью для флюидов и способны удерживать накопление газа вплоть до его проникновения далее вверх по разрезу по отдельным механическим нарушениям или под действием архимедовой силы. Очевидной является пространственная связь “ярких пятен” с разломными зонами. Не полностью очевидным является наличие современной активности вдоль этих разломов. По данным [15] в районе имеется несколько слабых событий с магнитудами от 1.5 до 2.5, но по сравнению с северными районами Баренцева моря их число слишком мало для получения надежных выводов.

Сравнение положения группы “ярких пятен” и глубинного сейсмического разреза поперек разломной зоны авлакогена (рис. 4) показывает, что они группируются над разломной зоной, нарушающей комплексы нижнего карбона и более древние [4]. В этой части разреза кроме явного смещения осей синфазности, указывающего на вертикальные тектонические нарушения, наблюдаются локальные проседания фаз (см. рис. 4), которые встречаются при снижении скоростей сейсмических волн из-за наличия низкоскоростных флюидов в толще осадочных пород. Кроме того, там же наблюдаются вертикальная зона потери когерентности сигнала и смена полярности отражений, которые также указывают на присутствие флюидов (рис. 4). Разрез показывает, что наиболее раздробленными являются палеозойские комплексы, но при этом для свободного газа сохраняются пути миграции вверх до современного



**Рис. 4.** Фрагмент разреза МОВ ОГТ 078602 (положение разреза показано на врезке). Желтым прямоугольником показано положение скопления “ярких пятен” в Печоро-Колвинском авлакогене, выявляемых по данным высокого разрешения, пересекаемых разрезом ОГТ, но не различимых на низких частотах. Прямоугольником показано положение особенностей волнового поля, описываемых в тексте.

дна Печорского моря, где наблюдаются его скопления и прорывы в водную толщу [14].

Таким образом, пространственное распределение в приповерхностных осадках Печорского моря аномалий типа “яркое пятно”, являющихся индикаторами скопления газа, связано с системой разломных зон, нарушающих палеозойские осадочные комплексы и в ряде случаев мезозойские комплексы, формируя каналы для поступления газа вверх по разрезу. Скопления газа в четвертичных осадках могут быстро мигрировать вверх, вплоть до прорыва в водную толщу, что создает опасные последствия для инженерной и навигационной деятельности на акватории шельфа. Нарушение стабильности приповерхностных скоплений может происходить по многим причинам: механические воздействия, деградация мерзлоты, неотектонические движения и подъем под действием архимедовой силы при ее превышении сопротивления слоев, удерживающих газ. Газонасыщенные области осадков проявлены дискретно как по горизонтали в виде вертикальных зон осветления, сливающихся в единый фронт в зависимости от интенсивности глубинного источника газа, так и по вертикали — в зависимости от степени проницаемости слабоконсолидированных слоев четвертичных осадков. В районе также существует вероятность появления аномалий, связанных с обрушением надсолевых толщ.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны экипажу НИС “Академик Николай Страхов” за самоотверженный труд в тяжелых условиях, сделавший возможным получение полевых материалов. Авторы также выражают благодарность Российскому Федеральному Геологическому Фонду (<https://rfgf.ru>) за доступ к сейсмическим данным.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФИ № 18-05-70040 “Ресурсы Арктики”, оцифровка положений сейсмоакустических аномалий выполнена в рамках темы госзадания ГИН РАН № 0135-2019-0076 “Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами” и темы госзадания ИО РАН № 0128-2021-0005.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богоявленский В.И.* Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // *Бурение и нефть*. 2015. № 6. С. 4–10.
2. *Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А. и др.* Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // *Геология и геофизика*. 2002. № 43 (7). С. 587–598.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская.

- Листы R-39,40 – о. Колгуев – прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. (2013). СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 477 с.
4. *Казанин Г.С., Павлов С.П., Шлыкова В.В., и др.* Сейсмо-геологическое строение Печорского и юго-восточной части Баренцева морей на основе интерпретации каркасной сети сейсмических профилей МОВ ОГТ 2Д // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Выпуск 3. М.: ГЕОС, 2011. С. 59–81.
  5. *Костин Д.А., Тарасов Г.А.* Четвертичный осадочный чехол Баренцево-Карского бассейна. Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии // Выпуск 3. М.: ГЕОС, 2011. С. 107–130.
  6. *Крапивнер Р.Б.* Кризис ледниковой теории: аргументы и факты. М.: ГЕОС, 2018. 320 с.
  7. *Левченко О.В., Мерклин Л.Р.* Сейсмостратиграфия. // В кн. “Печорское море. Системные исследования”. (Ред. Е.А. Романкевич, А.П. Лисицин, М.Е. Виноградов). М.: “Море”, 2003. С. 321–354.
  8. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Дмитриевский Н.Н. и др.* Исследования в 38-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” в Баренцевом море // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 885–887.  
<https://doi.org/10.31857/S0030-1574595885-887>
  9. *Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н. и др.* Геолого-геофизические исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” в 2019 г. // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 334–336.  
<https://doi.org/10.31857/S0030157420010177>
  10. *Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г.* Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Апатиты: КНЦ РАН, 2001. С. 40–51.
  11. *Соборнов К.О.* Раннемезозойские деформации Северной Евразии: геодинамика и нефтегазоносность // Труды Международной геолого-геофизической конференции “ГеоЕвразия–2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии”. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2018. С. 76–80.
  12. *Соборнов К.О., Коротков И.П., Соколов С.Ю.* Соли верхнего ордовика северо-востока Тимано-Печорского бассейна: строение и влияние на нефтегазоносный потенциал // Труды IV Международной геолого-геофизической конференции “ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях” Т. 1. Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”, 2021. С. 278–281.
  13. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Абрамова А.С. и др.* Картирование звуко рассеивающих объектов в северной части Баренцева моря и их геологическая интерпретация // Океанология. 2017. Т. 57. № 4. С. 655–662.
  14. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Сухих Е.А. и др.* Проявления глубинной дегазации в водной толще и верхней части разреза Печорского моря // Георесурсы / Georesources 2019. Т. 21. № 4. С. 68–76.  
<https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.68-76>
  15. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin. 2012. Available from <http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional/> (last accessed 15.11.2012)
  16. *Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al.* Current Rates and Mechanisms of Subsea Permafrost Degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. V. 8. pp. 1–13.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms15872>

## MANIFESTATIONS OF DEGASSING IN THE UPPER PART OF THE SECTION OF THE PECHORA SEA SEDIMENTS AND ITS LINK TO TECTONICS

S. Yu. Sokolov<sup>a, #</sup>, E. A. Moroz<sup>a</sup>, G. D. Agranov<sup>a, c</sup>, E. A. Sukhikh<sup>a</sup>, R. A. Ananyev<sup>b</sup>,  
A. A. Razumovskiy<sup>a</sup>, and O. V. Levchenko<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>c</sup> Earth Science Museum, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup> E-mail: [sokolov@yandex.ru](mailto:sokolov@yandex.ru)

Presented by Academician of the RAS K.E. Degtyarev April 13, 2021

The paper analyzes the spatial distribution of subsurface seismoacoustic anomalies of the “bright spot” type in the Pechora Sea, which are indicators of free gas accumulation. Anomalies are associated with deep faults that cuts Paleozoic and, in some cases, Mesozoic sedimentary complexes. Gas-saturated fluids migrate up to Quaternary sediments, in which the studied phenomenon is observed. Gas emissions into the water column have dangerous consequences for man-made activities in the shelf area when the stability of near-surface accumulations is disturbed. Gas-saturated areas in sediments occurred in space discretely both horizontally and vertically. Ensuring safe human activity on the Arctic shelves requires a detailed study of degassing manifestations.

**Keywords:** deep degasation, Pechora sea, seismoacoustic anomalies, “bright spots”, tectonic faults