

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-78-84



## УЧАСТИЕ ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ПИНГОПОДОБНЫХ ФОРМ НА ДНЕ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

✉ Еременко Е.А.<sup>1,2</sup>, Кохан А.В.<sup>1</sup>, Мороз Е.А.<sup>1</sup>, Денисова А.П.<sup>1,2</sup>, Мутовкин А.Д.<sup>3</sup>, Соколов С.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

✉ [eremenkoeaig@gmail.com](mailto:eremenkoeaig@gmail.com)

Интерпретация результатов многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненных в рамках рейсов научно-исследовательских судов «Академик Николай Страхов» в 2018-2019 гг., позволила установить, что важную роль в формировании пингоподобных форм на шельфе Печорского моря играют грязевулканические процессы. Процесс выдавливания к поверхности пластично-мерзлых толщ в районах распространения островной мерзлоты приводит к нарушению ее сплоченности, появлению трещин, по которым поток флюидов движется вверх по разрезу, вовлекая в движение мелкодисперсный материал. Пингоподобные формы маркируют каналы выхода флюидов на поверхность. Характер залегания слагающих их отложений позволяет заключить, что они накапливались последовательно путем периодического наслоения (подобно грязевулканическим). Промерзание глинистых отложений, слагающих пингоподобные формы, по-видимому, имеет сингенетическую природу и происходило в условиях отрицательных придонных температур при участии дроссельного эффекта Джоуля-Томпсона.

Ключевые слова: Арктика, дегазация, флюидогенный рельеф, многолетняя мерзлота, грязевой вулканизм

**Введение и методы исследования.** Флюидогенный субаквальный рельеф, представленный покмарками, пингоподобными формами (ППФ), куполами газового пучения, грязевыми вулканами и диапирами, является одним из основных генетических типов микро- и мезоформ, распространенных на шельфах Арктики. К настоящему времени эти формы обнаружены в акватории моря Бофорта, Баренцева, Карского, Лаптевых и Чукотского. Образование флюидогенного рельефа связывается с процессом дегазации недр. Флюиды, подъем которых приводит к образованию перечисленных форм, по крупным тектоническим нарушениям проникают в осадочный чехол, где, в том числе, скапливаются в структурных ловушках [Van Rensbergen et al., 2007]. Выше по осадочному разрезу их миграция происходит вдоль тектонических нарушений более низкого ранга. Приуроченность ареалов повышенной плотности флюидогенных форм к тектоническим нарушениям неоднократно отмечалась в опубликованных работах [Кохан и др., 2023; Мороз и др., 2023; Соколов и др., 2023; Semenov et al., 2023; Thorsnes et al., 2023]. Слагающие дно рыхлые осадки отличаются сравнительно более высокой пористостью, вертикальной и латеральной литологической мозаичностью, что нередко приводит к рассеиванию флюидопотока. На интенсивность проявления процесса дегазации у поверхности дна (в том числе, на плотность и размеры образуемых форм) влияет геологическое строение осадочного разреза. Так, наличие флюидоупоров (толщи многолетнемерзлых пород (ММП), сильно глинистых плотных осадков, к примеру, ледникового происхождения [Денисова и др., 2022]) при прочих равных условиях приводит к изменению морфологии и плотности флюидогенных форм. При участии мощных толщ ММП в строении дна флюидогенные формы редки, плотность их закономерно возрастает со снижением сплоченности и мощности ММП [Paull et al., 2007; Кохан и др., 2023].

В образовании отдельных типов флюидогенных форм (в частности, ППФ) принимает участие не только собственно дегазация, но также другие процессы, ею стимулированные. В частности, по результатам интерпретации данных, полученных в 2018 (38-й рейс), 2019 (41-й рейс) гг. в ходе работ на НИС «Академик Николай Страхов» в Баренцевом море установлено, что важную роль в формировании ППФ играют грязевулканические процессы и формирование субмаринной сингенетической мерзлоты.

Комплексные исследования в акватории юго-восточной части Баренцева моря (в Печорском море) включали многолучевое эхолотирование и сейсмоакустическое профилирование, выполненные на полигонах по сетке галсов. При проведении работ использовались: многолучевой эхолот SeaBat 8111 (частота 100 кГц, 101 луч размером  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  каждый при разрешении по детальности при определении дна равном 3.7 см); GPS, сенсоры движения и гирокомпас, объединенные в приборе Applanix POS-MV; приантенный датчик скорости звука SVP-70; SVP зонд; высокочастотный акустический профилограф EdgeTech 3300. Для обработки результатов использовалось программное обеспечение PDS2000 v.3.7.0.47 (для обработки данных многолучевого эхолотирования) и RadExPro (для обработки результатов акустического профилирования). Съемка велась с одновременной работой всех устройств по системе галсов с межгалсовым расстоянием около 170-200 м и выполнением нескольких станций измерения скорости звука на каждом полигоне.

**Результаты работ.** Полигон, обследованный в 2018 и 2019 гг. в Печорском море, располагается на глубинах от 55 до 82 м. Район относится к области развития островной мерзлоты [Амлас..., 2004], льдистость верхних 70 м осадочного разреза составляет менее  $73\text{ м}^3/\text{м}^2$  [Overduin et al., 2019]. В 1995 году на полигоне было выполнено бурение с бурового судна «Бавенит» [Бондарев и др., 2002], опубликованные сведения о строении геологического разреза дна были использованы нами при интерпретации сейсмических данных.

Детальная обработка и интерпретация разрезов, полученных методом высокочастотного сейсмического профилирования, позволила выявить, что в строении дна на полигоне распространения ППФ в Печорском море принимают участие пять сеймостратиграфических комплексов, три из которых были выделены ранее в работе [Бондарев и др., 2002].

Практически повсеместно с поверхности залегают осадки ССК I с хаотической высокоамплитудной записью мощностью от первых метров до 10-11 м, ассоциируемые с морскими голоценовыми и/или позднеплейстоценовыми (сартанскими) суглинками (согласно [Бондарев и др., 2002]). Мощность толщи максимальна во впадинах и понижениях между соседними валобразными поднятиями дна и ППФ. ССК I подстилается акустически слоистым ССК II мощностью от 1-2 м до 25 м, ассоциируемым с морскими и аллювиальными позднеплейстоценовыми (сартанскими) песками и суглинками. Осадки ССК II характеризуются высокой газонасыщенностью. В восточной части обследованного полигона осадки ССК II подстилаются акустически непрозрачной толщиной, относимой к ССК III, которая ассоциируется с кровлей сильнольдистых ММП, представленных позднеплейстоценовыми глинами, суглинками, супесями и пылеватыми песками каргинско-казанцевского возраста (по [Бондарев и др., 2002]). В западной части полигона отложения ССК II подстилаются осадками ССК IV, для которого характерна неупорядоченная акустическая запись, представляющая собой сочетание акустически прозрачных плохо выделяющихся на разрезах и локальных высокоамплитудных участков. ССК IV ассоциируется с частично мерзлой и местами сильно газонасыщенной толщиной позднеплейстоценовых глин, суглинков, супесей и пылеватых песков (каргинско-казанцевского возраста). Изменение акустического облика подстилающих ССК II горизонтов с востока на запад связывается со снижением сплошности ММП в этом направлении и увеличением газонасыщенности осадков.

ППФ практически полностью сложены отложениями ССКV, для которых характерно отсутствие выраженной акустической слоистости, низкая степень акустической прозрачности, что может указывать как на то, что они сложены мерзлыми породами, так и на то, что слагающие тонкодисперсные осадки сильно газонасыщены. Результаты бурения двух скважин на вершинных поверхностях ППФ (скв. 480, 479 по [Бондарев и др., 2002]) подтвердили наличие ММП в 0,4-0,5 м от поверхности дна. Мерзлые породы под ППФ прослежены до глубины около 100 м и представлены пластично-мерзлыми глинами и суглинками с многочисленными шлирами пресного льда. При этом льдистость в верхних 50 м достигает 50-90%, ниже – снижается до 30% [Бондарев и др., 2002].

Характер залегания отложений ССКV позволяет сделать выводы о механизме накопления этого осадка. Так, на фрагментах сейсмоакустических разрезов, проходящих через ППФ (рис. 1), отчетливо видно, что отложения ССКV прорывают толщу ССКI и ССКII в виде диапиров (рис. 1, А (ППФ №№ 1, 2), В (ППФ № 7)), местами наслаиваются на ССКI (рис. 1, Б (ППФ №№ 3, 4)), вклиниваются в ССКI в виде полулинз (контактируют с голоценовыми илами в виде «пилы» фациального перехода) (рис. 1, В (ППФ №№ 5, 8)). Такой характер залегания указывает на то, что формирование отложений ССКV и ССКI происходило одновременно, путем периодического внедрения/наслоения первых на последние. По-видимому, образование ППФ протекает в голоцене одновременно с формированием толщи голоценовых морских илов. Результаты повторной съемки газопроявлений на обследованном полигоне позволили выявить, что над 80% ППФ в водной тоще присутствуют вертикальные акустические аномалии типа «факел», причем около половины их фиксировались два года подряд (в 2018 и 2019 гг.). Это позволяет заключить, что процесс разгрузки флюидов через ППФ активно протекает в настоящее время.

В то же время, по данным бурения [Бондарев и др., 2002] отложения, слагающие ППФ, являются мерзлыми, с характерным убыванием льдистости вниз по разрезу (от 90% близ поверхности дна до 30% на глубине более 50 м). Однако, наложение отложений ССКV на морские илы ССКI по периферии ППФ возможно лишь в том случае, если первоначально они (осадки ССКV), стекая/сползая по склонам ППФ, являлись тальми, а их промерзание произошло после непосредственного накопления. Таким образом, можно заключить, что формирование ППФ происходило после прорыва донных осадков ССКI и ССКII в результате последовательного накопления толщи ССКV сверху. Принимая во внимание глинистый состав осадков ССКV (по данным бурения [Бондарев и др., 2002]) можно предположить, что механизм образования ППФ имеет черты, схожие с грязевым вулканизмом, как это предполагалось в некоторых работах [Крапивнер, 2007; Миронюк, 2019].

Похожее внутреннее строение (фациальный контакт с голоценовыми морскими илами, признаки диапиризма и пр.) установлено для группы ППФ «Gary Knolls» в восточной части трога Маккензи в море Бофорта (глубины 40-65 м) [Blasco et al., 2013]. Отличием ППФ Печорского моря от типичных грязевых вулканов, распространенных на шельфе, является мерзлое состояние слагающих их пород, установленное бурением. Возможно, промерзание грязевулканических построек происходит вследствие охлаждения насыщенных пресной водой лютовулканитов (название, принятое для грязевулканических отложений согласно [Методическое руководство..., 2009]) в условиях отрицательной придонной температуры воды (установлена в акватории Печорского и Карского морей согласно модели [Bogoyavlensky et al., 2018]). В то же время, возможно и промерзание канала выхода флюидов изнутри вследствие дроссельного эффекта Джоуля-Томпсона [Мельников и др., 1998]. Таким образом, полученные данные указывают на то, что ММП, слагающие ППФ в Печорском море, являются субмаринными и сингенетическими. При этом в разрезе дна на глубинах от 25-30 до 50-55 м присутствуют и ММП, имеющие субаэральное происхождение (были образованы в условиях LGM) во время осушения Печорского шельфа.

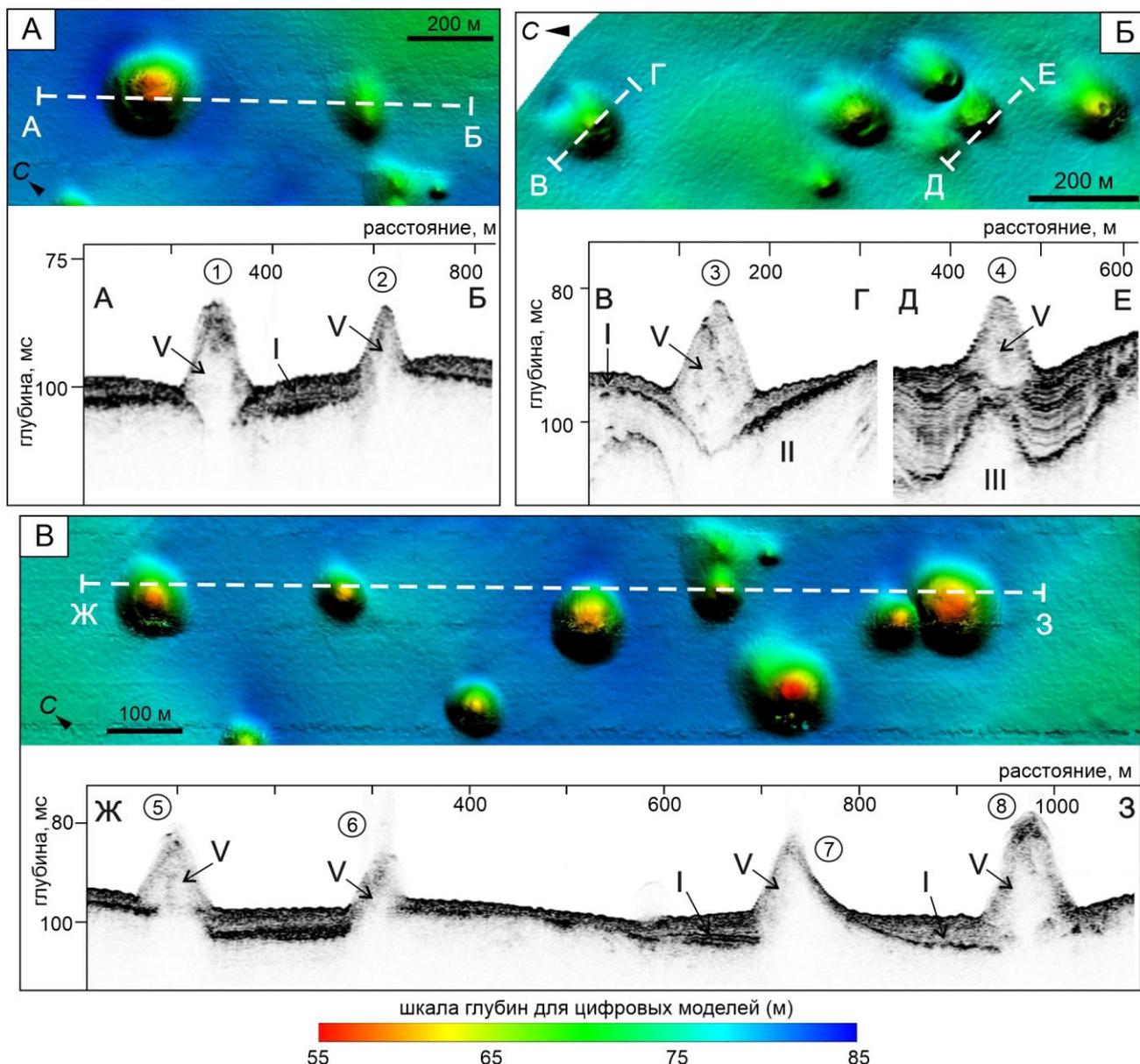


Рис. 1. Морфология ППФ и их внутреннее строение (по данным высокочастотного сейсмического профилирования). Римскими цифрами указаны номера выделенных сейсмостратиграфических комплексов, цифрами в кружках обозначены ППФ, упоминаемые в тексте.

**Выводы.** Пингоподобные формы являются одним из видов флюидогенного рельефа, их образование происходит в условиях сложного взаимодействия процесса дегазации с литологически и геокриологически неоднородной толщей пород осадочного чехла. При наличии высокой интенсивности потока флюидов (в районах нефтегазоперспективных структур и областях потенциально возможной миграции пресных вод под подошвой мерзлоты) близ подошвы ММП могут возникать зоны аномально высокого пластового давления. В результате происходит выдавливание глинистых пластичномерзлых пород вверх к поверхности дна и образование диапироподобных структур в разрезе. Этот процесс приводит к нарушению сплоченности ММП, частичному их оттаиванию, появлению трещин, по которым поток флюидов движется вверх по разрезу, вовлекая в движение мелкодисперсный материал, слагающий как сами ММП, так и перекрывающие толщи. ППФ маркируют каналы выхода флюидов на поверхность. Характер залегания слагающих их отложений позволяет заключить, что они накапливались последовательно путем периодического наслоения (подобно грязевулканическому). Промерзание

лютовулканитов, слагающих ППФ, по-видимому, имеет сингенетическую природу и происходило в условиях отрицательных придонных температур при участии дроссельного эффекта Джоуля-Томпсона.

**Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

## ЛИТЕРАТУРА

- Атлас: геология и полезные ископаемые шельфов России. 2004. М.: ГИН РАН. 108 с.
- 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. Т. 43. № 7. С. 587–598.
- Денисова А.П., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Признаки дегазации в области распространения ледникового и водно-ледникового рельефа в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Вып. 9. С. 78-86. doi:10.24412/2687-1092-2022-9-78-86
- Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. doi:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9
- Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли. 1998. Т. 11. № 4. С. 51-57.
- Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третьего поколения). 2009. СПб.: ВСЕГЕИ. 198 с.
- Миронюк С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А. и др. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение / В сб.: Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М. ИО РАН. 2019. Т. 5. С. 192-196.
- Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П. и др. Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского желоба (Печорское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512, № 1. С. 5–11. doi:10.31857/S2686739723600820
- Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. и др. Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС «Академик Николай Страхов» // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 164-179. doi:10.25283/2223-4594-2023-2-164-179
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development // Geological Survey of Canada, Open File 6989. 2013. 340 p. doi:10.4095/292616
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. 2018. Vol. 8. Is. 12. 453. doi:10.3390/geosciences8120453
- Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. Is. 6. P. 3490-3507. doi:10.1029/2018JC014675
- Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R., Blasco S.M. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L01603. doi:10.1029/2006GL027977

*Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al.* Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. №3. 125509. doi:10.1016/j.chemer.2019.04.005

*Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al.* Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms // *Norwegian Journal of Geology*. 2023. Vol. 103. 202309. doi:10.17850/njg103-2-4

*Van Rensbergen P., Rabaute A., Colpaert A. et al.* Fluid migration and fluid seepage in the Connemara Field, Porcupine Basin interpreted from industrial 3D seismic and well data combined with high-resolution site survey data // *International Journal of Earth Sciences*. 2007. Vol. 96. Is. 1. P. 185-197. doi:10.1007/s00531-005-0021-2

## **MUD VOLCANIC PROCESSES IN THE DEVELOPMENT OF PINGO-LIKE FEATURES IN PECHORA SEA**

*Eremenko E.A.<sup>1,2</sup>, Kokhan A.V.<sup>1</sup>, Moroz E.A.<sup>1</sup>, Denisova A.P.<sup>1,2</sup>, Mutovkin A.D.<sup>3</sup>, Sokolov S.Yu.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Interpretation of the results of multibeam echo sounding and high-frequency seismic profiling, carried out as part of the voyages of the research vessels “Akademik Nikolay Strakhov” in 2018-2019, allowed us to establish that mud volcanic processes play an important role in the formation of pingo-like features on the Pechora Sea shelf. The process of squeezing out plastic-frozen strata to the surface in areas of discontinuous submarine permafrost distribution leads to a violation of its cohesion, the appearance of cracks along which fluid flow moves up the section, involving finely dispersed material in the movement. Pingo-like features mark channels for fluids to reach the surface. The stratigraphy of the sediments composing pingo-like features allows us to conclude that they accumulated sequentially through periodic superposition (similar to mud volcanoes). The freezing of mud volcanic clayey sediments apparently has a syngenetic nature and occurred under conditions of subzero bottom temperatures with the participation of the throttling effect.

Keywords: *Arctic, degassing, fluidogenic landforms, submarine permafrost, mud volcanism*

## **REFERENCES**

Atlas: geology and minerals of the Russian shelves. 2004. M.: GIN RAS. 108 pp. (In Russ.)

*Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A.* and others. Sub-permafrost gas accumulations in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. Vol. 43. No. 7. P. 587–598. (In Russ.)

*Denisova A.P., Moroz E.A., Eremenko E.A., Sukhikh E.A., Arkhipov V.V.* Signs of degassing within the glacial shelf in the north-eastern part of the Barents sea // *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2022. Is. 9. P. 78-86. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-78-86

*Kokhan A.V., Moroz E.A., Eremenko E.A., Denisova A.P., Ananiev R.A., Sukhikh E.A., Nikiforov S.L., Sokolov S.Yu., Razumovskiy A.A.* Fluidogenic landforms within the permafrost zone on the shelf of the Pechora and Kara seas // *Lomonosov Geography Journal*. 2023. N. 3. P. 104-124. (In Russ.) doi:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9

*Melnikov V.P., Fedorov K.M., Wolf A.A., Spesivtsev V.I.* Analysis of a possible scenario for the formation of bottom ice mounds on the shelf of the Pechora Sea // *Cryosphere of the Earth*. 1998. Vol. 11. No. 4. P. 51-57. (In Russ.)

Methodological guidelines for compiling and preparing for publication sheets of the state geological map of the Russian Federation at a scale of 1:1,000,000 (third generation). 2009. SPb.: VSEGEI. 198 p. (In Russ.)

*Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A.* and others. Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure / In: *Geology of the seas and oceans: Materials of the XXIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology*. M. IO RAS. 2019. T. 5. pp. 192-196. (In Russ.)

*Moroz E.A., Eremenko E.A., Denisova A.P. et al.* The Manifestation of Degassing in the Sedimentary Cover and Relief of the Southern Novaya Zemlya Trench (Pechora Sea) // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 512. Is. 1. P. 773–778. doi: 10.1134/S1028334X23601013

*Sokolov S.Y., Moroz E.A., Zarayskaya Y.A., Abramova A.S., Ananyev R.A., Sukhikh E.A.* Mapping of dangerous geological objects and processes at the Northern and Central parts of the Barents Sea shelf according to the hydroacoustic data from RV “Akademik Nikolai Strakhov”. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 164-179. (In Russ.) doi:10.25283/2223-4594-2023-2-164-179

*Blasco S., Bennett R., Brent T. et al.* 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development // *Geological Survey of Canada, Open File 6989*. 2013. 340 p. doi:10.4095/292616

*Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al.* Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // *Geosciences*. 2018. Vol. 8. Is. 12. 453. doi:10.3390/geosciences8120453

*Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al.* Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. Vol. 124. Is. 6. P. 3490-3507. doi:10.1029/2018JC014675

*Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R., Blasco S.M.* Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. L01603. doi:10.1029/2006GL027977

*Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al.* Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea // *Geochemistry*. 2020. Vol. 80. №3. 125509. doi:10.1016/j.chemer.2019.04.005

*Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al.* Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms // *Norwegian Journal of Geology*. 2023. Vol. 103. 202309. doi:10.17850/njg103-2-4

*Van Rensbergen P., Rabaute A., Colpaert A. et al.* Fluid migration and fluid seepage in the Connemara Field, Porcupine Basin interpreted from industrial 3D seismic and well data combined with high-resolution site survey data // *International Journal of Earth Sciences*. 2007. Vol. 96. Is. 1. P. 185-197. doi:10.1007/s00531-005-0021-2