

УДК 551.462:551.435.536(268.45)

УСЛОВИЯ, МЕХАНИЗМ И СТАДИИ РАЗВИТИЯ ПИНГОПОДОБНЫХ ФОРМ НА ШЕЛЬФЕ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ[#]

© 2024 г. Е. А. Еременко^{1,2*}, А. В. Кохан¹, Е. А. Мороз¹, А. П. Денисова^{1,2},
С. Ю. Соколов¹, А. Д. Мутовкин³

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

³ Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, Москва, Россия

* E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2023 г.

После доработки 12.02.2024 г.

Принята к публикации 28.03.2024 г.

На основе результатов многолучевого эхолотирования и сейсмического профилирования, выполненных в 2018–2019 гг. в рамках научных рейсов НИС “Академик Николай Страхов”, с привлечением всех ранее опубликованных данных разработана концептуальная схема образования пингоподобных форм на шельфе Печорского моря (юго-восточная часть акватории Баренцева моря между островами Колгуев и Вайгач). При интерпретации генезиса рельефа дна на полигоне площадью около 12 км² использованы как полученные авторами новые геофизические данные, так и материалы бурения, опубликованные ранее. Установлено, что образование пингоподобных форм на дне происходит при наличии многолетнемерзлых пород в условиях отрицательных температур придонных вод под действием потока флюидов из недр. Основной причиной возникновения пингоподобных форм является образование зон аномально высокого пластового давления в толще или ниже подошвы многолетней мерзлоты в результате миграции флюидов к поверхности дна. Образованию пингоподобных форм предшествует появление валообразного поднятия дна за счет выдавливания пластично-мерзлых глинистых толщ к приповерхностной части разреза. В дальнейшем в результате нарушения сплошности и частичного оттаивания многолетней мерзлоты на своде валообразного поднятия начинается рост пингоподобной формы, представляющей собой грязевулканическую постройку. Миграция газа по вертикальному каналу к вершинному кратеру может сопровождаться промерзанием слагающих пингоподобную форму глинистых осадков в результате дроссельного эффекта Джоуля–Томпсона. Истекающие из вершинного кратера грязевые массы могут промерзать на склонах пингоподобной формы в результате охлаждения содержащейся в них пресной воды в условиях отрицательных придонных температур. Увеличение размера грязевулканической постройки приводит к снижению давления близ подошвы деградирующей под действием флюидопотока многолетней мерзлоты, что приводит к постепенному оседанию валообразных поднятий дна и возникновению компенсационных впадин. По результатам повторного мониторинга газопроявлений установлено, что более половины пингоподобных форм на обследованном полигоне в настоящее время являются действующими каналами миграции флюидов из недр к поверхности дна и в водную толщу.

Ключевые слова: дегазация, флюиды, флюидогенный рельеф, грязевой вулканизм, диапиры, акустические аномалии, Баренцево море

DOI: 10.31857/S2949178924020075, EDN: PNPYQE

1. ВВЕДЕНИЕ

Пингоподобные формы (ППФ) — ringo-like features (PLF) по (Paull et al., 2007) — представляют собой поло-

жительные формы микрорельефа, распространенные на шельфах морей Арктики. Впервые они были обнаружены в море Бофорта в 1969 г. в ходе региональной геологической съемки дна и интерпретированы как реликтовые криогенные образования, сохранившиеся при затоплении шельфа в ходе голоценовой трансгрессии (Shearer et al., 1971). Дальнейшие комплексные исследования (многолучевое эхолотирование, сейсмопрофилирование, опробование) позволили предположить, что ППФ имеют субаквальное про-

[#] Ссылка для цитирования: Еременко Е.А., Кохан А.В., Мороз Е.А. и др. (2024). Условия, механизм и стадии развития пингоподобных форм на шельфе Печорского моря. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 55, № 2. С. 138–153. <https://doi.org/10.31857/S2949178924020075>; <https://elibrary.ru/PNPYQE>

исхождение и образуются в результате выдавливания осадков под действием потока флюидов из недр при участии мерзлотных и грязевулканических процессов (Poley, 1982; Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007, 2022; Blasco et al., 2013; Миронюк и др., 2019а, 2019б; Миронюк, 2020; Кохан и др., 2023). Наличие акустических аномалий, связанных с повышенной газонасыщенностью донных осадков, установлено в районах развития ППФ в море Бофорта (Paull et al., 2007, 2022; Blasco et al., 2013), в Баренцевом и Карском морях (Бондарев и др., 2002; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015; Кохан и др., 2023). В районах развития ППФ в водной толще фиксируются вертикальные акустические аномалии факельного типа (как правило, локализованные непосредственно над ППФ) и ареалы повышенной акустической мутности, связанные со взмучиванием осадков поднимающимися от поверхности дна флюидами (Paull et al., 2007, 2022; Blasco et al., 2013; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015; Кохан и др., 2022, 2023).

Результаты геолого-геофизических работ демонстрируют приуроченность участков с повышенной плотностью ППФ к нефтегазоперспективным структурам и крупным тектоническим нарушениям (Blasco et al., 2013; Миронюк и др., 2019а; Кохан и др., 2023). Кроме того, в распространении ППФ на шельфах морей Арктики прослеживается связь с ареалами многолетнемерзлых пород (ММП). Так, наибольшая плотность ППФ характерна для районов, где современная криолитозона отличается островным распространением или выклинивается близ бровки шельфа (Blasco et al., 2010; Paull et al., 2022; Кохан и др., 2023; Grob et al., 2023). По имеющимся на настоящий момент опубликованным сведениям, ППФ не были встречены в районах, где не обнаружены ММП, а в районах, где мерзлота имеет повышенную мощность и сплошность, ППФ редки (Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015; Кохан и др., 2023).

Флюиды, подъем которых приводит к образованию флюидогенных форм (ППФ, покмарок, куполов газового пучения и пр.), имеют, в основном, глубинное происхождение. По крупным тектоническим нарушениям они проникают в осадочный чехол, где, в том числе, скапливаются в нефтегазовых ловушках (Хант, 1982; Van Rensbergen et al., 2007). Выше по осадочной толще миграция флюидов к поверхности дна происходит вдоль тектонических нарушений более низкого ранга. Перекрывающие дно рыхлые четвертичные осадки отличаются сравнительно более высокой пористостью, вертикальной и латеральной литологической неоднородностью, что нередко приводит к рассеиванию флюидопотока. Кроме того, поднимающиеся в осадочном чехле флюиды при

определенных термобарических условиях (высокое давление и низкая температура, низкие значения геотермического градиента — до 2.2 °С на 100 м по (Vogoyavlensky et al., 2018)) могут образовывать газогидратные залежи. В Баренцево-Карском регионе благоприятные условия для формирования и дальнейшего стабильного существования газогидратов установлены на глубинах более 350—400 м. На меньших глубинах газогидратные залежи нестабильны, и их деградация может являться причиной развития процесса дегазации (Vogoyavlensky et al., 2018). В качестве флюидоупоров могут выступать ММП, а на более локальном уровне — сильно глинистые донные осадки, к примеру, ледникового происхождения (Денисова и др., 2022).

Таким образом, формирование флюидогенного рельефа происходит под действием глобального процесса дегазации, однако тип образующихся форм, их морфология и плотность определяются локальными факторами (глубиной моря, наличием ММП, близостью к нефтегазоперспективным структурам и тектоническим разломам, литологическим составом, строением и мощностью донных осадков). Флюидогенные формы маркируют локализованные каналы и ареалы распространения дегазации, а значит, изменение интенсивности последней должно проявляться в изменении морфологии рассматриваемых форм. Проследить стадии развития флюидогенных форм (в частности, ППФ), а также оценить современную активность дегазации на участках их развития возможно путем применения высокоразрешающих методов геолого-геофизических исследований в ходе повторных съемок дна. Такие исследования были выполнены на шельфе моря Бофорта, где показали наличие значительных скоростей изменения рельефа дна на участках распространения ППФ за 8 лет — с 2011 по 2019 гг. (Paull et al., 2022). В настоящей статье рассматриваются результаты повторной съемки дна на участках распространения ППФ в Печорском море. Цель исследования заключалась в оценке активности дегазации в 2018—2019 гг., а также в выявлении основных стадий развития ППФ с использованием сейсмических профилей и данных многолучевой батиметрической съемки, выполненной с разрешением 2 м.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках 38-го (2018 г.) и 41-го (2019 г.) рейсов НИС “Академик Николай Страхов” выполнены комплексные геолого-геофизические исследования на участке распространения ППФ в акватории Печорского моря. При проведении работ использовались: многолучевой

эхолот SeaBat 8111 (частота 100 кГц, 101 луч размером $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ каждый с разрешением по детальности при определении дна равном 3.7 см); GPS, сенсоры движения и гирокомпас, объединенные в приборе Applanix POS-MV (точность определения местоположения 0.5—2.0 м в режиме DGPS); приантенный датчик скорости звука SVP-70; SVP зонд; высокочастотный акустический профилограф EdgeTech 3300 (частотно-модулированный сигнал от 2 до 6 кГц длительностью 40 мс (центральная частота 4 кГц), вертикальное разрешение 6—10 см); сейсмоакустический комплекс “Геонт-Шельф”, включающий электроискровой излучатель типа “спаркер” и две секции сейсмической приемной антенны по 16 каналов. Также использовалось программное обеспечение PDS2000 v.3.7.0.47 — для обработки данных многолучевого эхолотирования и RadExPro — для обработки результатов акустического профилирования. Съёмка велась с одновременной работой всех устройств по системе галсов СЗ—ЮВ простирания с межгалсовым расстоянием около 170—200 м и выполнением нескольких станций измерения скорости звука на полигоне. В настоящей работе используются данные сеймопрофилирования с источником типа “спаркер” и акустического профилографа, полученные в ходе работ 38-го рейса (2018 г.), а также данные многолучевого эхолотирования и акустического профилирования, полученные в 41-м рейсе (2019 г.).

В результате съёмки и последующей обработки данных получена цифровая модель рельефа (ЦМР) дна выбранного участка полигона размером 7.5×1.8 км общей площадью порядка 12.1 км^2 с разрешением 2×2 м, длина отработанных профилей на участке составила около 110 км (9 галсов). Вдоль галсов получены разрезы акустического профилографа в формате SEG-Y. Обработка данных, полученных с помощью спаркера, также производилась в программе RadExPro.

В программном пакете SMT Kingdom с учетом скорости звука в осадке около 1600 м/с и полученного времени полупробега звука в разрезе были рассчитаны глубины залегания отражающих горизонтов ниже поверхности дна. При максимальном усилении на разрезах были отпикированы вертикальные звуко-рассеивающие объекты типа “факел” в водной толще, интерпретируемые нами как газопроявления. Необходимо отметить, что все полученные данные о газопроявлениях основываются на их двухмерных проекциях на разрезах акустического профилографа. ЦМР были подгружены в ГИС-пакет QGIS3.28, где на их основе были получены цифровые модели крутизны и кривизны поверхности дна. В проект QGIS также подгружались данные о расположении газопроявлений и геометрии отражающих горизонтов на разрезах акустического

профилографа. Далее проводились измерения морфометрических параметров основных форм рельефа и комплексная интерпретация полученных данных.

2.1. Характеристика района исследований

Район работ располагается в северо-восточной части Печорского моря, глубины изменяются от 55 до 82 м (рис. 1). Обследованный полигон частично захватывает участок, изученный в ходе работ АО “Арктические морские инженерно-геологические экспедиции” (АМИГЭ) в 1988 и 1995—1996 гг. (Бондарев и др., 2002). Именно здесь в 1988 г. были впервые описаны ППФ на арктическом шельфе России, а в 1995 г. выполнено бурение как непосредственно на самих ППФ, так и на прилегающих участках дна.

В тектоническом отношении полигон расположен в пределах Тимано-Печорской плиты в зоне контакта Русановской складчато-надвиговой зоны и восточной части Печорской синеклизы (Гуляевско-Долгинской структурной зоны) (Система Баренцева моря, 2021). Выровненный рельеф дна полого снижается в пределах полигона с запада (средняя глубина около 65—70 м) на восток (75—80 м). Привлекая данные бурения (Бондарев и др., 2002), можно заключить, что территория представляет собой аллювиально-морскую равнину позднеплейстоценового возраста.

В пределах изучаемого участка дна Печорского моря с поверхности залегают голоценовые морские илы (mH), мощность которых изменяется от 0.5—1.0 м до 5—7 м (Бондарев и др., 2002). Они подстилаются толщей морских и аллювиальных отложений сартанского возраста

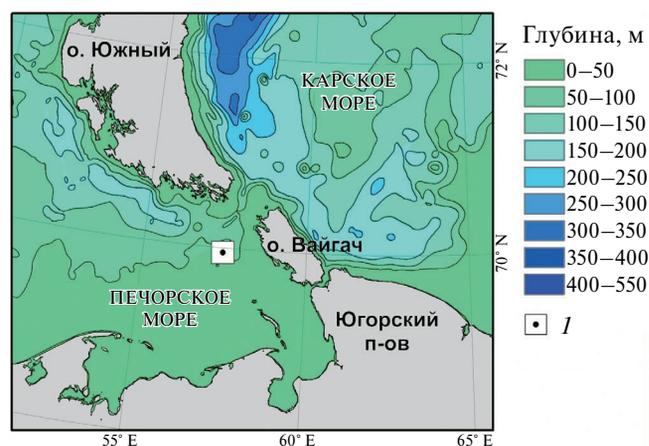


Рис. 1. Местоположение полигона. Батиметрическая основа по данным GEBCO_2014 (Weatherall et al., 2015). 1 — расположение района работ.

Fig. 1. Location of key-site. Bathymetry according to GEBCO_2014 data (Weatherall et al., 2015). 1 — location of the key-site

(а, mПsr), представленных в верхних 20—30 м суглинками, супесями и глинами с ритмичной слоистостью, нередко с линзами торфа; в нижних 10—20 м — пылеватыми песками с включением органики и прослоями глины (Рокос, 1996; Бондарев, 2002). Ниже залегает толща (мощностью 20—50 м и более) глин и суглинков с прослоями песка, относимая к морским осадкам каргинского и казанцевского возраста (mПkr+kz) (Бондарев, 2002).

По результатам бурения и сейсмопрофилирования (Мельников, Спесивцев, 1995; Бондарев и др., 2002) установлено, что на обширных пространствах шельфа Печорского моря в строении верхней части разреза присутствует многолетняя мерзлота. Она характеризуется островным распространением (Атлас..., 2004). В частности, непосредственно на обследованном участке ММП вскрыты бурением на глубинах от 0.4 м до 25—30 м (Бондарев и др., 2002), а несколько южнее (в пределах Варандейской и Приразломной нефтегазоперспективных площадей, глубины моря 15—25 м) — на глубине от 22 до 40 м (Мельников, Спесивцев, 1995). Льдистость ММП дна Печорского моря изменяется в широких пределах — от 10—30 % до 50 % и более. По результатам моделирования (Overduin et al., 2019) средние значения объемной льдистости верхних 70 м разреза составляют от 5—10 до 25 м³/м².

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Морфология ППФ

Субгоризонтальная фоновая поверхность аллювиально-морской равнины в пределах полигона осложнена многочисленными преимущественно изометричными ППФ высотой от 3—4 до 20—25 м, в поперечнике — до 150—250 м (рис. 2, (а)). Их плотность в пределах северо-восточной части Печорского моря (в том числе, непосредственно на полигоне) составляет от 10—15 до 35—45 шт./км² (Кохан и др., 2023).

В западной части обследованного полигона ППФ приурочены к плоским пониженным участкам дна — впадинам с нечеткими бровками относительной глубиной 5—10 м, расположены хаотично, иногда группами из двух-трех форм. В восточной части полигона прослеживается приуроченность подавляющей части ППФ к гребням валообразных поднятий дна, относительная высота которых достигает 10—15 м, ширина (по подножью) — 200—250 м. Значительная часть валообразных поднятий имеют субмеридиональную ориентацию. Округлые гребни валов нередко осложнены хорошо выраженными рвами относительной глубиной до 2—3 м и шириной 8—12 м.

Наиболее крупные ППФ располагаются в основном на ровных участках дна впадин, реже — на валообразных поднятиях. Их диаметр достигает 250 м, высота — от 12—15 до 20—25 м. ППФ округлые в плане, как правило, по контуру окружены компенсационными понижениями глубиной до 3—4 м. Зачастую в их вершинных частях наблюдаются воронки глубиной до 2—2.5 м, а склоны крутизной от 10—15 до 25—35° осложнены оползневыми псевдотеррасами. Более мелкие ППФ имеют диаметр от 35—50 м до 120—170 м, высоту от 5—7 до 10—12 м, редко бывают окружены компенсационными впадинами, расположены как на плоских участках дна впадин, так и на гребнях валообразных поднятий. Крутизна их склонов, как правило, менее 10—15°. Высота самых мелких ППФ не превышает 5—7 м, диаметр составляет около 100—120 м, а крутизна склонов — до 10—15°. Приурочены они, за редким исключением, к гребням валообразных поднятий дна. Таким образом, ППФ восточной, относительно более мелководной части полигона, характеризуются в среднем более скромными размерами, в сравнении с теми, что расположены в западной части обследованной площади.

3.2. Акустические аномалии, связанные с подъемом флюида

Как в 2018, так и в 2019 гг. в водной толще в пределах полигона зафиксированы многочисленные вертикальные акустические аномалии типа “факел” (рис. 2, (б), рис. 3, (г), табл. 1). Появление звуко-рассеивающих объектов в водной толще связано, прежде всего, с присутствием пузырьков газа и взвеси тонкого материала и объясняется подъемом флюида в процессе дегазации. Вертикальные аномалии чаще всего фиксировались непосредственно над ППФ, но местами отмечены и вне этих форм.

Из 145 ППФ, выявленных на полигоне, лишь над 24 формами ни в 2018 г., ни в 2019 г. не зафиксированы вертикальные акустические аномалии типа “факел”. 19 ППФ не пройдены галсами, поэтому о наличии и постоянстве подъема флюида над ними судить на основе имеющихся данных нельзя. Над остальными формами (102 шт.) вертикальные аномалии установлены, причем над 74 ППФ они фиксировались как в 2018, так и в 2019 гг. Выявлено, что устойчивые газопроявления типа “факел” более характерны для наиболее крупных ППФ и ППФ среднего размера в западной части полигона. Для самых мелких форм, преобладающих в восточной части района работ, характерен в целом более прерывистый во времени характер проявления дегазации.

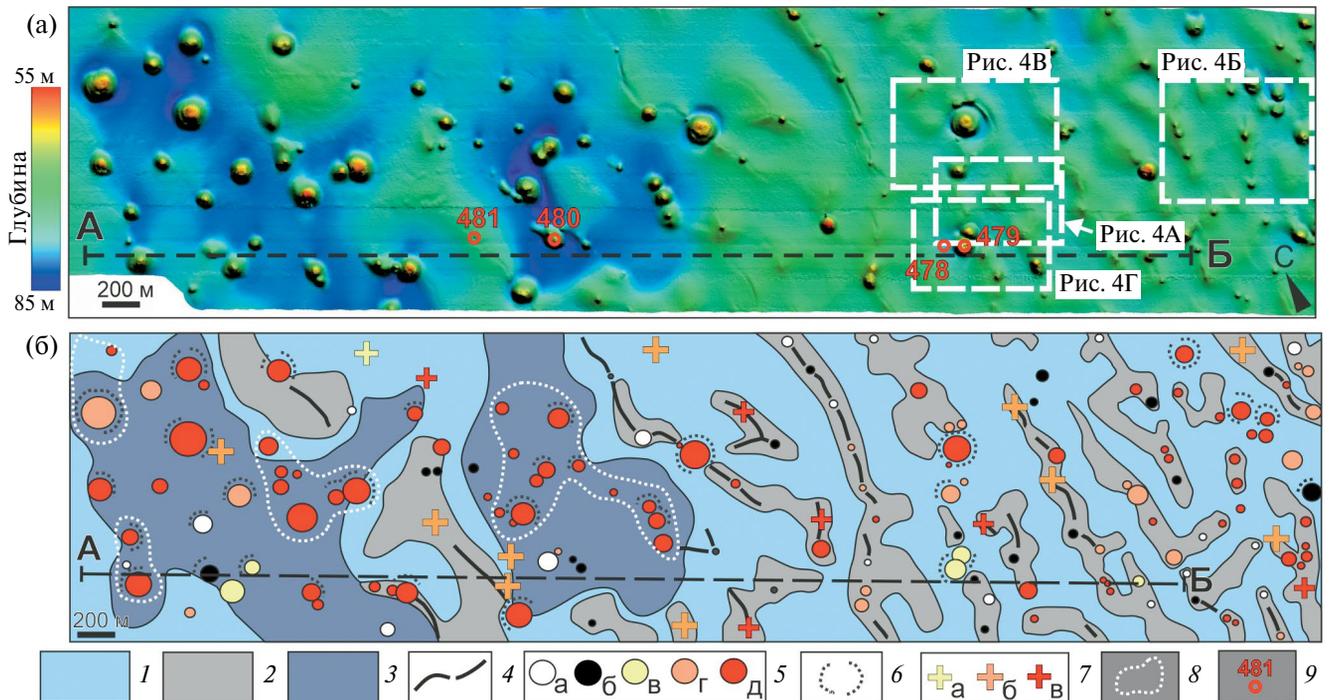


Рис. 2. Рельеф полигона: (а) — ЦМР и положение профиля А–Б, представленного на рис. 3, белым пунктиром выделены врезки, представленные на рис. 4; (б) — геоморфологическое строение дна и результаты повторной съемки газопроявлений в водной толще.

1 — выровненные поверхности аллювиально-морской равнины; 2 — валообразные поднятия; 3 — впадины; 4 — рвы на гребнях валов; 5 — газопроявления факельного типа в водной толще над ППФ (размер круга соответствует размеру ППФ): а — не установлены, так как ППФ не пересекалась галсом съемки; б — отсутствуют; выявлены: в — в 2018 г., г — в 2019 г., д — в 2018 и 2019 гг.; 6 — компенсационные впадины вокруг ППФ; 7 — газопроявления в водной толще вне ППФ (выявлены: а — в 2018 г., б — в 2019 г., в — в 2018 и 2019 гг.); 8 — области наибольшей плотности акустических аномалий, связанных с подъемом флюида в водной толще; 9 — буровые скважины, описанные в (Бондарев и др., 2002).

Fig. 2. Bathymetry of the key-site: (a) — digital elevation model and position of section A–B, presented in fig. 3, white dotted line marks the insets shown in fig. 4; (b) — geomorphological map of the bottom and the results of repeated surveys of gas manifestations in the water column.

1 — flat surface of the alluvial-marine plain; 2 — roll-like rises of the bottom; 3 — depressions; 4 — moats (on the crests of the rises); 5 — vertical acoustic anomalies (gas manifestations) in the water column above the PLF (the size of the circle reflects the size of the PLF): a — not identified, because the PLF was not intersected by the survey traverse, б — absent, в — identified in 2018, г — identified in 2019, д — identified in 2018 and 2019; 6 — compensation depressions around the PLF; 7 — gas manifestations in the water column outside the PLF (a — identified in 2018, б — identified in 2019, в — identified in 2018 and 2019); 8 — areas of the highest density of acoustic anomalies associated with the rise of fluid in the water column; 9 — boreholes described in (Bondarev et al., 2002).

Таблица 1. Результаты повторной съемки газопроявлений в водной толще

Table 1. Results of repeated survey of gas manifestations in the water column

Год съемки	Вертикальные акустические аномалии типа “факел”		
	над ППФ	над валообразными поднятиями дна	над ровным дном
2018 г. (38-й рейс)	80 (из них 6 — не выявлены в 2019 г.)	4	1
2019 г. (41-й рейс)	96 (из них 22 — не выявлены в 2018 г.)	10 (из них 6 не выявлены в 2018 г.)	4 (из них 3 — не выявлены в 2018 г.)
2018 и 2019 гг.	74	5	1

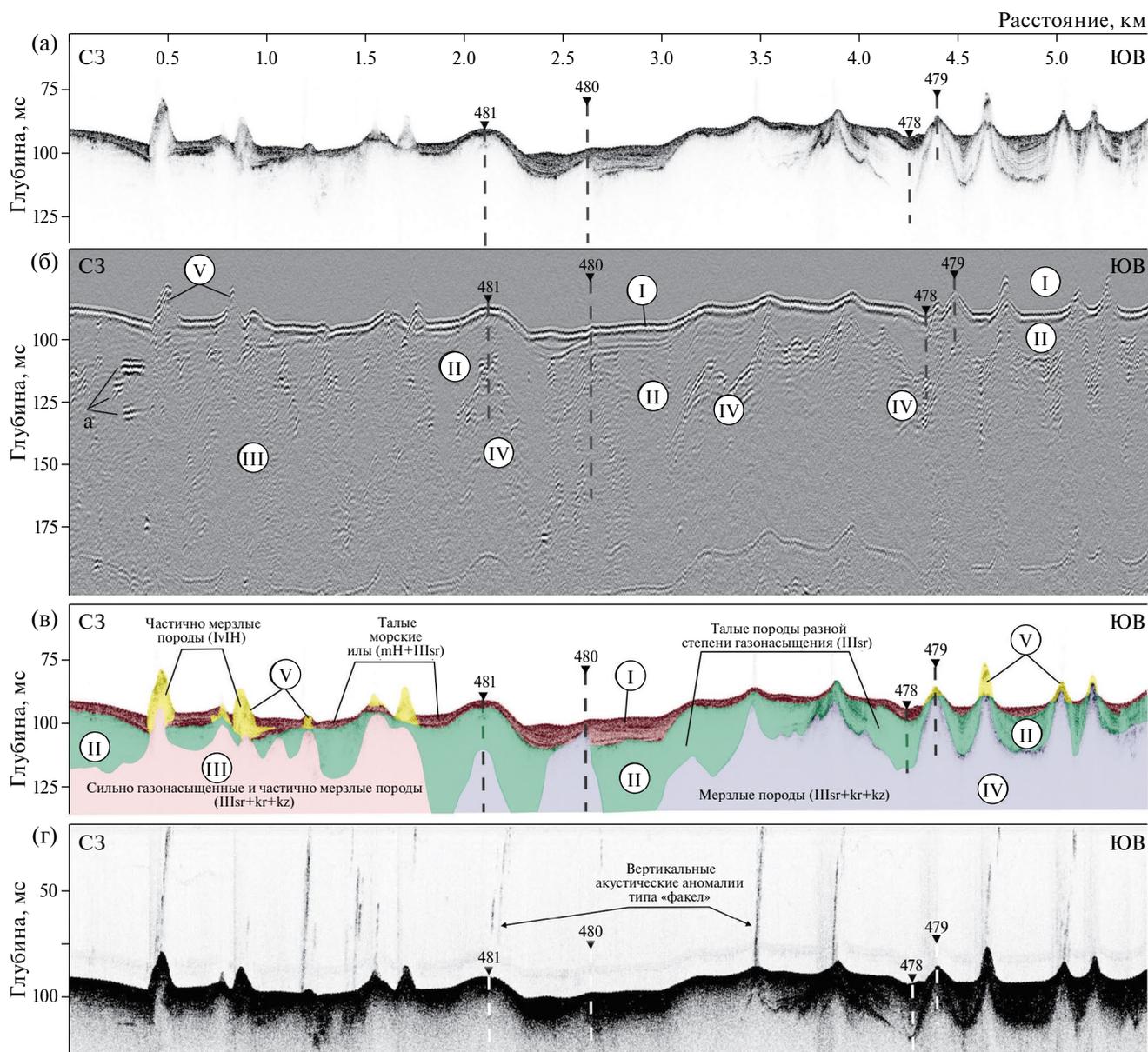


Рис. 3. Сеймостратиграфия донных осадков на участке распространения ППФ вдоль линии профиля А–Б (положение профиля показано на рис. 2). Разрезы, полученные: (а) — методом высокочастотного акустического профилирования, (б) — с помощью спаркера (римскими цифрами показаны ССК, упоминаемые в тексте (а — локальные высокоамплитудные участки в толще ССКIV); (в) — результаты интерпретации сейсмоакустических данных; (г) — разрез, полученный методом высокочастотного сейсмического профилирования с применением программного усиления для отображения газопроявлений в водной толще.

Fig. 3. Seismostratigraphy of bottom sediments in the area of PLF distribution along the section А–Б (the position of the section is shown in fig. 2): (а) — section obtained by high-frequency acoustic profiling; (б) — section obtained using a sparker (roman numerals indicate the SSCs mentioned in the text; the letter “а” shows local high-amplitude areas in the SSCIV sequence); (в) — results of interpretation of seismoacoustic data; (г) — section obtained by high-frequency seismic profiling using software amplification to display gas manifestations in the water column.

Отдельные вертикальные акустические аномалии фиксировались и над валообразными поднятиями дна, в том числе, с выраженными рвами на их округлых гребнях. Вне ППФ и валообразных поднятий вертикальные акустические аномалии, ассоцииру-

емые с подъемом флюида, единичны. Отметим, что в 2019 г. общее число зафиксированных вертикальных акустических аномалий в водной толще оказалось несколько больше по сравнению с 2018 г. (111 шт. и 85 шт. соответственно).

3.3. Сейсмостратиграфия донных осадков

Для интерпретации результатов высокочастотного сейсмопрофилирования, выполненного акустическим профилографом (рис. 3, (а)) и спаркером (рис. 3, (б)), привлекались результаты бурения, выполненного на полигоне в 1995 г. с бурового судна “Бавенит” (скважины отмечены на рис. 2, (а) и рис. 3) (Бондарев и др., 2002). В строении верхней части осадочного разреза принимают участие породы пяти сейсмостратиграфических комплексов (ССК) (рис. 3, (в)), ассоциируемых с разновозрастными тальми и многолетнемерзлыми отложениями, выделенными на полигоне в предшествующих работах [три из них были ранее описаны в работе (Бондарев, 2002)].

Практически повсеместно с поверхности дна на обследованном полигоне залегают осадки ССК I с хаотической высокоамплитудной записью мощностью от 1—2 до 10—11 м, ассоциируемые с морскими голоценовыми и/или позднеплейстоценовыми (сартанскими) илами и суглинками (mIII_{Sr}-H). Мощность толщи достигает максимальных значений в компенсационных впадинах по периферии крупных ППФ и понижениях между соседними валообразными поднятиями дна. В пределах валов она снижается до 2—3 м.

Ниже залегает акустически слоистый ССК II мощностью от первых метров до 20—25 м (морские и аллювиальные позднеплейстоценовые (сартанские) пески и суглинки (a, mIII_{Sr})). В толще осадков ССК II присутствуют акустические аномалии, связанные с газонасыщенностью и подъемом флюидов (вертикальное осветление и аномалии типа “плоское пятно”). Степень газонасыщенности осадка возрастает в пределах полигона с востока на запад. В частности, в западной части района работ из-за высокой газонасыщенности акустическая слоистость толщи ССК II прослеживается лишь фрагментарно.

В западной части полигона осадки ССК II подстилаются акустически непрозрачной толщей ССК III. Ее кровля представляет собой сложно построенную систему отражений различной геометрии и имеет сложный рельеф. Она интерпретируется нами как кровля сильнольדיстых ММП, представленных позднеплейстоценовыми глинами, суглинками, супесями и пылеватыми песками (нижняя часть, mIII_{Sr}, mIII_{kr}+kz).

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 записи. ССК IV интерпретируется

нами как частично (фрагментарно) мерзлая и местами сильно газонасыщенная толща позднеплейстоценовых глин, суглинков, супесей и пылеватых песков (нижняя часть, mIII_{Sr}, mIII_{kr}+kz). Изменение акустического облика подстилающих ССК II горизонтов с востока на запад связывается нами со снижением сплошности ММП в этом направлении и увеличением газонасыщенности осадков.

ППФ практически полностью сложены отложениями ССК V, для которых характерны отсутствие выраженной акустической слоистости и низкая степень акустической прозрачности. Это может указывать как на то, что ППФ сложены мерзлыми породами, так и на то, что слагающие их тонкодисперсные осадки сильно газонасыщены. Результаты бурения двух скважин на вершинных поверхностях ППФ [рис. 3, скв. 480, 479 (Бондарев и др., 2002)] подтвердили наличие ММП, кровля которых располагается в 0.4—0.5 м от поверхности дна. Они представлены пластично-мерзлыми глинами и суглинками с многочисленными шлирами пресного льда и прослеживаются до глубины более 50 м. При этом в скв. 480 льдистость в верхних 50 м достигает 50—90 %, ниже — опускается до 30 % (Бондарев и др., 2002). В северо-западной части разреза А—Б (рис. 3, (а, в)), а также на разрезах через ППФ (рис. 4, (б)) т. 3, (г) т. 2) отчетливо видно, что отложения ССК V прорывают толщу ССК I в виде диапиров, местами наслаиваются на ССК I и/или вклиниваются в виде полулинз. Такой характер залегания указывает на формирование отложений ССК V и ССК I в течение одного геологического интервала времени путем периодического внедрения/наслоения первых на последние. Наслоение отложений ССК V на морские илы ССК I по периферии ППФ возможно лишь в том случае, если первоначально они (осадки ССК V), стекая/сползая по склонам ППФ, являлись тальми.

Сейсмостратиграфия донных осадков на изученном полигоне отличается высокой латеральной неоднородностью. В частности, **в пределах впадин** отмечается повышенная (до 10—11 м) мощность ССК I, причем в целом она возрастает с востока на запад (рис. 3, (в)). Под ССК I залегают в разной степени газонасыщенные породы ССК II, фиксируемая мощность которых в восточной части полигона составляет от первых метров до 40—55 м. Характерно линзовидное залегание этих осадков во впадинах, по периферии впадин отмечается снижение их мощности и, нередко, выклинивание (рис. 4, (а, б, г)). В западной части полигона толща ССК II отличается большей газонасыщенностью и проследить ее подошву затруднительно.

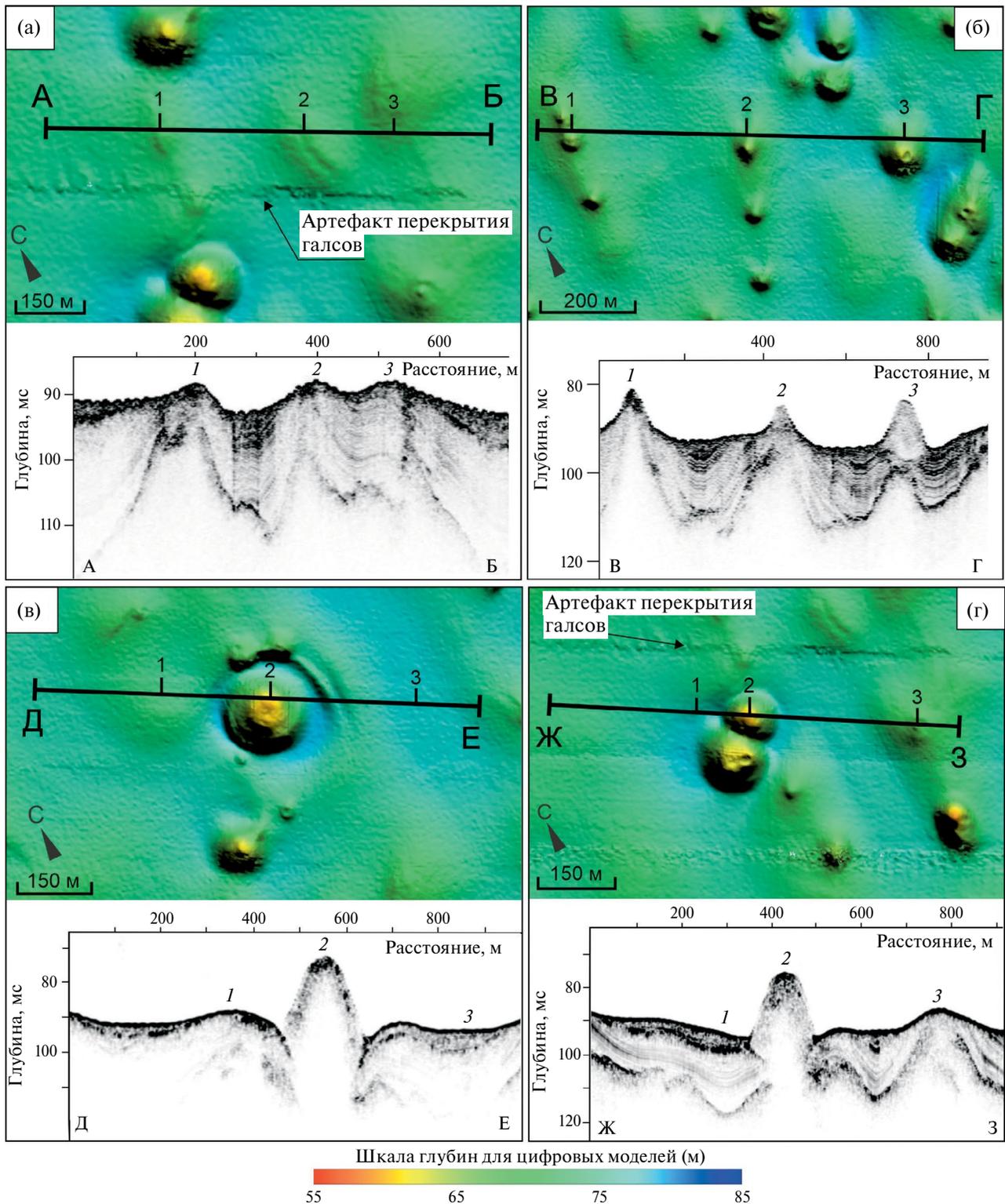


Рис. 4. Морфология и внутреннее строение валов (а), впадин (б) и пингоподобных форм (в, г) (местоположение участков показано на рис. 2, (а)). Для каждого участка приведен фрагмент ЦМР и соответствующий профиль, полученный методом высокочастотного сейсмического профилирования. Цифрами на профилях (т. 1–3) показаны формы рельефа (впадины, валы, ППФ), упоминаемые в тексте.

Fig. 4. Morphology and internal structure of rises (a), depressions (б) and pingo-like features (в, г) (the location of the areas is shown in fig. 2, (a)). For each site, a fragment of the DEM and the corresponding section obtained by high-frequency seismic profiling are shown. The numbers on the sections (1, 2, 3) indicate landforms (depressions, rises, PLF) mentioned in the text.

В разрезе **валообразных поднятий** мощность ССКI уменьшается до первых метров (рис. 4, (а), т. 1–3), нередко этот комплекс и вовсе отсутствует (рис. 4, (г), т. 3). Ниже могут залегать породы ССКII в виде пологой выпуклой складки (рис. 4, (а), т. 1–3; 4, (в), т. 1) или ССКIII в виде диапироподобного поднятия (рис. 4, (г), т. 3). Отметим, что в случае наличия в разрезе вала толщи ССКII в ней отчетливо видны вертикальные зоны акустического осветления, указывающего на подъем флюидов (рис. 4, (а), т. 1, 2; 4, (г), т. 3). Описанные черты внутреннего строения валов хорошо прослежены в восточной части полигона. В западной же части они менее четкие, так как подстилающие ССКI толщи отличаются высокой газонасыщенностью (рис. 3, (в)).

ППФ, независимо от их размера, сложены осадками ССКV, причем подошва (в виде яркой отражающей границы) в центральной части форм заметна, как правило, только по данным спаркера (рис. 3, (б)), а на разрезах акустического профилографа не видна. На разрезах, прошедших через краевые части ППФ, подошва ССКV трассируется гораздо лучше. Отчетливо видно, что ССКV налегает на породы ССКI (нередко — контактирует с ними в виде пилообразного фациального перехода — см. рис. 3, (в), рис. 4, (г), т. 2), ССКII (рис. 4, (б), т. 3, или, реже, ССКIII (рис. 4, (б), т. 1). Таким образом, можно заключить, что формирование ППФ произошло 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 работе (Крапивнер, 2007). Похожее внутреннее строение установлено для группы ППФ Gary Knolls в восточной части трога Маккензи в море Бофорта на глубинах 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 (скв. 479 и 480 — см. Бондарев и др., 2002). В то же время, отдельные черты микроморфологии ППФ (наличие кратеров на вершинной поверхности, оплывин на склонах) подчеркивают сходство их с ППФ моря Бофорта, происхождение которых связывается в том числе с процессами грязевого вулканизма (Paull et al., 2007; Blasco et al., 2013).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные и результаты их интерпретации позволяют заключить, что формирование ППФ на дне неразрывно связано с явлением дегазации

(на это указывают многочисленные акустические аномалии в воде и осадочной толще). Необходимо отметить, что за почти полвека с момента обнаружения ППФ на дне моря Бофорта (Shearer et al., 1971) представления о механизме образования и возрасте этих форм неоднократно менялись. Краткий обзор существующих представлений о генезисе ППФ на шельфах представлен в работе (Кохан и др., 2023). Имеющиеся на данный момент сведения о строении и распространении ППФ на шельфах Арктики позволяют заключить, что они представляют собой субаквальные формы, образованные в голоцене на участках, где в разрезе донных осадков присутствовали и/или существуют до сих пор ММП.

Распространенной точкой зрения является формирование ППФ в результате выдавливания пластично-мерзлых глинистых толщ под действием потока флюидов из недр. При этом происхождение этого флюида связывается: с таянием мерзлоты и деградацией внутримерзлотных газогидратных залежей в ходе голоценовой трансгрессии (Paull et al., 2007), с таянием мерзлоты и высвобождением заключенных в ней газов (Бондарев и др., 2002), поступлением пресных вод к поверхности дна в результате таяния ММП и притока их с суши под подошвой ММП (Frederick, Buffett, 2015, 2016; Gwiazda et al., 2018; Paull et al., 2022; Diak et al., 2023). Присутствие ММП в строении ППФ может быть связано с ее новообразованием, в частности в результате охлаждения придонными водами (с отрицательной температурой) выдавленных на поверхность под действием флюидов талых, содержащих пресную воду грунтов (Serov et al., 2015; Gwiazda et al., 2018; Paull et al., 2022). Одним из возможных механизмов формирования ММП, слагающих ППФ, является промораживание вмещающих донных осадков поднимающимся из глубинных нефтегазоносных структур газом за счет его расширения и дроссельного эффекта Джоуля—Томпсона, приводящего к падению температуры грунта вокруг канала истечения газа (Мельников и др., 1998). В этом случае под ППФ формируется колонна льдонасыщенных грунтов с убыванием льдистости вниз по разрезу, что отмечено, в частности, в скв. 480 на изучаемом полигоне (Бондарев и др., 2002).

Для обоснованного заключения о механизме формирования ППФ на дне косвенных данных, получаемых геофизическими методами (даже с высоким разрешением), очевидно, недостаточно. Интерпретация сейсмических профилей без привязки к буровым скважинам представляется поверхностной, а ее результаты — нередко спорными. Именно поэтому

для выявления генезиса и механизма формирования ППФ в северо-восточной части Печорского моря нами был выбран участок, где геологическое строение дна установлено по результатам бурения (Бондарев и др., 2002). Интерпретация сейсмических профилей была выполнена с учетом данных скважин, а выделенные в работе (Бондарев и др., 2002) ССК прослежены на всем полигоне. Высокая детальность цифровой модели рельефа, полученной в ходе многолучевого эхолотирования, а также со-

пряженный анализ результатов сеймопрофилирования с использованием профилографа и спаркера позволили получить новые данные об особенностях сеймостратиграфии донных осадков и морфологии ППФ, а также выделить основные этапы образования этих форм (рис. 5).

Предшествующими исследованиями доказано наличие в толще ММП и близ их подошвы зон аномально высокого пластового давления (АВПД). В частности, такая зона вскрыта бурением в 1995 г.

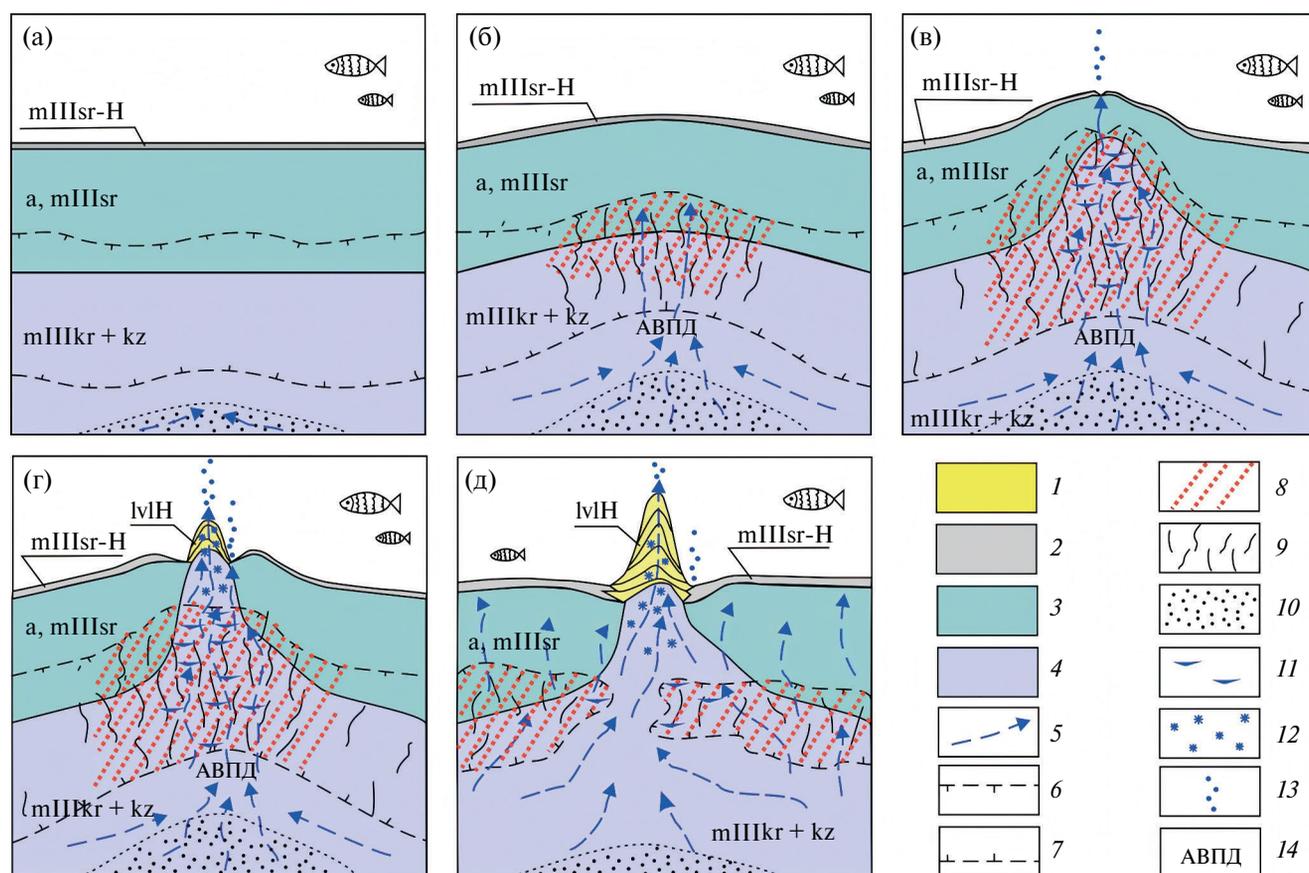


Рис. 5. Стадии формирования ППФ: (а) — начала формирования зоны АВПД, (б) — зарождения валообразного поднятия дна, (в) — развитого валообразного поднятия дна, (г) — “молодости” ППФ, (д) — “зрелости” ППФ и опускания вала.

1 — лютовулканы голоценового возраста (Н); 2 — морские осадки голоценового (Н) и сартанского (IIIsr) возраста; 3 — морские и аллювиальные осадки сартанского (IIIsr) возраста; 4 — морские отложения каргинско-казанцевского (IIIkr+kz) возраста; 5 — направления миграции флюидов, содержащих газ и пресную воду; 6 — кровля ММП; 7 — подошва ММП; 8 — участки нарушения сплошности ММП и газонасыщения; 9 — трещины в ММП; 10 — осадки песчаного/супесчаного состава; 11 — шлиеры пресного сегрегационного льда; 12 — субмаринные сингенетические ММП; 13 — подъем флюидов и взвеси в водной толще; 14 — зона аномально высокого пластового давления.

Fig. 5. Stages of PLF development: (a) — beginning of the formation of the zone of abnormally high reservoir pressure, (б) — the stage of the origin of the roll-like rise of the bottom, (в) — the stage of the developed roll-like rise of the bottom, (г) — the stage of “young” PLF, (д) — the stage of “mature” PLF and the sinking of the rise.

1 — mud volcanic sediments (H); 2 — marine sediments (H-IIIsr); 3 — marine and alluvial sediments (IIIsr); 4 — marine sediments (IIIkr+kz); 5 — directions of migration of fluids containing gas and fresh water; 6 — top of permafrost; 7 — base of permafrost; 8 — areas of discontinuity of permafrost and gas saturation; 9 — cracks in permafrost; 10 — sandy sediments; 11 — schlierens of fresh segregated ice; 12 — submarine syngenetic permafrost; 13 — rise of fluids and suspended matter in the water column; 14 — zone of abnormally high reservoir pressure.

на глубине 49.5 м на валообразном поднятии дна в пределах полигона (скв. 481, рис. 2, (а)): "... В результате произошел интенсивный выброс газа. Это привело к формированию на поверхности моря "котла кипения" диаметром 100—200 м, внутри которого отмечалось бурление воды, сопровождаемое отчетливо видимыми газовыми пузырями и выбросом взвешенных частиц грунта" (Бондарев и др., 2002, с. 595). На месте, где была пробурена скважина, в рельефе дна до сих пор присутствует четко выраженная воронка диаметром около 20 м и глубиной порядка 1 м. Таким образом, толща ММП выступает своеобразным флюидоупором, сдерживая выход флюидов к поверхности дна и в водную толщу. Формирование зоны АВПД, по-видимому, связано с миграцией содержащих пресную воду флюидов в талых, преимущественно, песчаных и супесчаных толщах вверх по разрезу. Неровный рельеф подошвы мерзлоты создает условия для образования "ловушек" флюидов, где и формируются в дальнейшем зоны АВПД (рис. 5, (а)).

Формирование зоны АВПД приводит к нарушению сплошности толщи ММП, ее частичному оттаиванию (некоторое повышение температуры может быть связано, среди прочего, с повышением давления (Хант, 1982)), формированию в ММП системы трещин, по которым начинается миграция флюида к поверхности дна (рис. 5, (б)).

В процессе миграции флюида, содержащего пресную воду, вверх по трещинам в ММП возможно его охлаждение и формирование шпиров сегрегационного льда. В то же время, глинистые породы, слагающие значительную часть толщи ММП (в частности, морские каргинско-казанцевские осадки ССКП) под действием давления начинают выдавливаться к поверхности дна, что приводит к формированию валообразных поднятий (рис. 5, (в)). При этом наиболее деформированной, трещиноватой и флюидонасыщенной является центральная часть такого поднятия. Флюиды проникают, в том числе, в перекрывающие отложения ССКП осадки ССКП, что приводит к формированию в них зон вертикального осветления (рис. 4, (а), т. 1, 2; 4, (б), т. 1, 2; 4, (г), т. 3). Как следствие, на гребнях валов нередко начинается просачивание флюида к поверхности дна и в водную толщу, что фиксируется акустическими аномалиями типа "факел". По-видимому, именно с растрескиванием и частичной просадкой талых осадков в пригребневой части валов связано формирование там четко выраженных рвов (рис. 4, (а), т. 2). После того, как в толще пород, слагающих вал, формируются устойчивые каналы, по которым происходит

миграция флюидов с их выходом в водную толщу, начинается постепенная разгрузка зоны АВПД.

Подъем флюидов сопровождается выносом глинистых частиц из фрагментарно оттаявших пород, выдавленных к поверхности дна. В результате во рву начинает формироваться грязевулканическая постройка — "молодая" ППФ (рис. 5, (г)). Грязевулканические отложения (по классификации ВСЕГЕИ (Методическое руководство..., 2009) — лютовулканисты (lvH)) поступают к поверхности дна через каналы выхода флюидов. Часть минеральной компоненты флюидов (глинистые и песчаные частицы) поднимаются в виде взвеси, другая же часть откладывается на склонах растущей ППФ. При интенсивном поступлении флюидов к поверхности лютовулканические отложения могут сползать по склонам ППФ с образованием оплывин. По данным бурения установлено, что отдельные ППФ сложены ММП (Бондарев и др., 2002). Возможно, промерзание грязевулканических построек происходит вследствие охлаждения насыщенных пресной водой лютовулканистов в условиях отрицательной придонной температуры воды (установлена согласно модели (см. Vogoyavlensky 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, могут являться субмаринными и сингенетическими.

На данный момент присутствие ММП в ядрах ППФ установлено бурением лишь для двух форм в пределах всего Печорского моря. Сложившееся представление о том, что все ППФ частично или полностью сложены ММП, основано на результатах сейсмостратиграфической корреляции. Таким образом, нельзя исключить, что некоторая часть ППФ могут быть полностью сложены тальми лютовулканистами, акустическая непрозрачность которых связана не с мерзлым их состоянием, а с высокой степенью газонасыщенности. В то же время морфологическая "свежесть" ППФ (к примеру, наличие у них склонов крутизной 20—25° и более) может быть отчасти связана как раз с мерзлым состоянием слагающих пород. Ведь в субаквальных условиях склоны, сложенные тонкодисперсным тальм осадком, редко сохраняют такие высокие показатели крутизны, оплывая, оползая и постепенно выполаживаясь. Для разрешения этого вопроса необходимо бурение скважин не только на вершинных поверхностях, но и на склонах серии ППФ.

Увеличение размера ППФ происходит в результате надстройки формы сверху. При этом давление

в области зоны АВПД постепенно снижается, что приводит к постепенному исчезновению валообразного поднятия дна (рис. 5, (д)), в том числе в результате выноса минеральной компоненты, и появлению вокруг ППФ компенсационной впадины (рис. 4, (в)). Не исключено, что на этой стадии непосредственно под ППФ многолетнемерзлые породы, являвшиеся своеобразным флюидоупором, деградируют полностью, что существенно облегчает подъем флюидов к поверхности дна.

Подавляющая часть зафиксированных ППФ представляют собой активные формы, по-прежнему служащие каналами разгрузки флюидов. В северо-западной части профиля А–Б (рис. 3, (а)) обнаружена одна из немногих ППФ, над которой ни в 2018 г., ни в 2019 г. не зафиксированы вертикальные акустические аномалии, связанные с подъемом газа. При этом морфология этой формы (ППФ третьего типа — самые мелкие) ничем не отличается от других подобных форм по размеру, но с признаками активной дегазации. Представляется, что в случае снижения интенсивности или полного прекращения подъема флюидов ППФ могут долго сохранять четкость морфологических очертаний, в том числе, по причине участия в их строении ММП.

Представленная схема последовательного развития флюидогенных форм (валов, ППФ) позволяет объяснить различия в морфологии ППФ (рис. 2, (а)) и строении чехла рыхлых отложений (рис. 3, (в)) в восточной и западной частях полигона. Так, в восточной части ММП характеризуются сравнительно более высокой степенью сплошности, большая часть ППФ находятся здесь на начальных стадиях своего развития (рис. 5, (г)), широко распространены валообразные поднятия дна (рис. 5, (б, в)). В западной же части полигона валы единичны, а ППФ характеризуются большим размером и степенью развитости (рис. 5, (д)). О причинах латеральной смены наблюдаемых стадий развития ППФ с востока на запад по имеющимся данным судить затруднительно. Представляется, что причиной этого может являться первоначально разная криогенная структура и мощность ММП, а также различия в интенсивности потока флюидов из недр, связанные с глубинными разломами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования позволяют сделать следующие выводы, касающиеся условий, механизма формирования и стадий развития ППФ на дне Печорского моря:

1. ППФ Печорского шельфа являются флюидогенными формами, образование которых на дне происходит под действием потока флюидов из недр при наличии ММП в строении осадочного чехла в условиях отрицательных температур придонных вод.

2. Причиной формирования ППФ является возникновение зон АВПД в толще или ниже подошвы ММП в результате миграции флюидов к поверхности дна. Локализация зон АВПД может быть связана с рельефом подошвы толщи ММП и литологическим составом подстилающих талых пород.

3. Формированию ППФ предшествует образование валообразного поднятия дна (линейного или изометричного) за счет выдавливания пластично-мерзлых глинистых толщ к приповерхностной части рыхлого чехла, нередко сопровождающееся его растрескиванием в области вершины или гребня. В результате нарушения сплошности и частичного оттаивания ММП на своде валообразного поднятия (иногда и в образовавшемся там рву) начинается рост ППФ, по сути, представляющей собой грязевулканическую постройку.

4. Миграция газа по вертикальному каналу к вершинному кратеру ППФ может сопровождаться промерзанием слагающих ППФ глинистых толщ (в т. ч. лютовулканитов) в результате дроссельного эффекта. Истекающие из вершинного кратера лютовулканисты могут промерзнуть на склонах ППФ в результате охлаждения содержащейся в них пресной воды в условиях отрицательных придонных температур моря.

5. Постепенный рост ППФ приводит к снижению давления близ подошвы деградирующей под действием флюидопотока мерзлоты, что приводит к постепенному оседанию валов и возникновению компенсационных впадин.

6. Более половины ППФ, обследованных на полигоне, представляют собой активные формы, в настоящее время служащие вертикальными каналами миграции флюидов из недр к поверхности дна и в водную толщу. При этом сохранение их хорошей морфологической выраженности связано с субмаринным сингенетическим промерзанием лютовулканистов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Обработка результатов экспедиционных работ, интерпретация и разработка концептуальной схемы проведены при поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 “Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас: геология и полезные ископаемые шельфов России. (2004). М.: ГИН РАН. 108 с.
- Бондарев В. Н., Рокос С. И., Костин Д. А. и др. (2002). Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря. *Геология и геофизика*. Т. 43. № 7. С. 587—598.
- Денисова А. П., Мороз Е. А., Еременко Е. А. и др. (2022). Признаки дегазации в области распространения ледникового и водно-ледникового рельефа в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа. В сб.: *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. Вып. 9. СПб: ВНИИОкеангеология им. И. С. Грамберга. С. 78—86. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-78-86>
- Кохан А. В., Мороз Е. А., Еременко Е. А. и др. (2022). Морфология пингоподобных форм на шельфах морей Печорского и Карского как индикатор их возраста и динамики. В сб.: *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. Вып. 9. СПб: ВНИИОкеангеология им. И. С. Грамберга. С. 143—148. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-143-148>
- Кохан А. В., Мороз Е. А., Еременко Е. А. и др. (2023). Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей. *Вестник Московского университета. Сер. 5. География*. Т. 78. № 3. С. 104—124. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9>
- Крапивнер Р. Б. (2007). Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа. *Геотектоника*. № 2. С. 73—89.
- Мельников В. П., Спесивцев В. И. (1995). Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние. 194 с.
- Мельников В. П., Федоров К. М., Вольф А. А., Спесивцев В. И. (1998). Анализ возможного сценария образования придонных ледяных гряд на шельфе Печорского моря. *Криосфера Земли*. 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. (2020). Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна. В сб.: *VIII Шукшинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием*. М.: МГУ. С. 37—43.
- Миронюк С. Г., Иванова А. А., Хлебникова О. А. (2019а). Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазоносности недр шельфа. В сб.: *Труды VII Международной научно-практической конференции “Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)”*. Т. II (IV). Тверь: ООО “ПолиПРЕСС”. С. 120—125.
- Миронюк С. Г., Колюбакин А. А., Голенок О. А. и др. (2019б). Грязевулканические структуры (вулканиды) Карского моря: морфологические особенности и строение. В сб.: *Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. М.: ИО РАН. Т. 5. С. 192—196.
- Рокос С. И. (1996). Стратиграфия и геохронология четвертичных отложений мелководного шельфа Печорского и Карского морей по данным инженерно-геологического бурения. В сб.: *Тезисы междунар. конф. “Эволюция биологических процессов и морские экосистемы в условиях океанического перигляциала”*. Мурманск: ММБИ. С. 22—23.
- Система Баренцева моря. (2021). Под ред. А. П. Лисицына. М.: ГЕОС. 671 с.
- Хант Дж. (1982). Геохимия и геология нефти и газа. М.: МИР. 706 с.
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. (2013). 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development. *Geol. Surv. Can. Open File 6989*. 340 p. <https://doi.org/10.4095/292616>
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. (2018). Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*. V. 8. № 12. 453. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453>
- Diak M., Böttcher M. E., Ehlert von Ahn C. M. et al. (2023). Permafrost and groundwater interaction: current state and future perspective. *Front. Earth Sci.* V. 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1254309>
- Frederick J. M., Buffett B. A. (2015). Effects of submarine groundwater discharge on the present-day extent of relict submarine permafrost and gas hydrate stability on the Beaufort Sea continental shelf. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* V. 120. Iss. 3. <https://doi.org/10.1002/2014JF003349>
- Frederick J. M., Buffett B. A. (2016). Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. V. 121. Iss. 3. P. 1383—1404. <https://doi.org/10.1002/2015JB012627>
- Grob H., Riedel M., Duchesne M. J. et al. (2023). Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators. *Geochem., Geophys., Geosyst.* V. 24. Iss. 5. e2023GC010884. <https://doi.org/10.1029/2023GC010884>
- Gwiazda R., Paull C. K., Dallimore S. R. et al. (2018). Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochem., Geophys., Geosyst.* V. 19. Iss. 9. P. 3039—3055. <https://doi.org/10.1029/2018GC007623>
- Overduin P., Von Deimling T. S., Miesner F. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). *J. Geophys. Res.: Oceans*. V. 124. Iss. 6. P. 3490—3507. <https://doi.org/10.1029/2018JC014675>
- Paull C. K., Dallimore S. R., Jin Y. K. et al. (2022). Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *PNAS*. V. 119. № 12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>
- Paull C. K., Lii W. U., Dallimore S. R. et al. (2007). Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L01603. <https://doi.org/10.1029/2006GL027977>

- Poley D. F. (1982). A detailed study of a submerged pingo-like feature in the Canadian Beaufort Sea (Arctic, Canada). Dalhousie University, Department of Geology. 105 p.
- Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al. (2013). Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20m at the South Kara Sea shelf. *Geophys. Res. Lett.* V. 40. <https://doi.org/10.1002/grl.50735>
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. (2015). Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* V. 120. Iss. 8. P. 1515–1529. <https://doi.org/10.1002/2015JF003467>
- Shearer J. M., Macnab R. F., Pelletier B. R., Smith T. B. (1971). Submarine pingoes in the Beaufort Sea. *Science*. V. 174. № 4011. P. 816–818.
- Van Rensbergen P., Rabaute A., Colpaert A. et al. (2007). 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. *Int. J. Earth Sci.* V. 96. Iss. 1. P. 185–197. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0021-2>
- Weatherall P., Marks K. M., Jakobsson M. et al. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Sci.* V. 2. Iss. 8. P. 331–345. <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>

PINGO-LIKE FEATURES IN THE PECHORA SEA: CONDITIONS, ORIGIN AND STAGES OF DEVELOPMENT¹

E. A. Eremenko^{a,b,#}, A. V. Kokhan^a, E. A. Moroz^a, A. P. Denisova^{a,b},
S. Yu. Sokolov^c, and A. D. Mutovkin³

^a *Geological Institute of RAS, Moscow, Russia*

^b *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^c *Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: eremenkoeaig@gmail.com*

Using the results of multibeam echo sounding and seismic profiling performed during 2018–2019 on the R/V “Akademik Nikolay Strakhov” and all previously published data, a conceptual scheme of the pingo-like feature formation on the shelf of the Pechora Sea (south-eastern part of the Barents Sea between the islands of Kolguev and Vaygach) was developed. During interpreting the genesis of the bottom topography at a key-site with an area of about 12 km², both new geophysical data obtained by the authors and previously published drilling materials were used. It has been established that formation of pingo-like features starts in the presence of submarine permafrost and subzero temperature of bottom waters under the influence of the fluid flow (degassing). Pingo-like feature development begins due to the formation of zones of abnormally high reservoir pressure below submarine permafrost as a result of vertical migration of fluids. The growth of a pingo-like feature begins from the formation of a roll-like rise of the bottom due to the extrusion of frozen clayey strata to the near-surface part of the section. Subsequently, as a result of disruption of the continuity and partial thawing of permafrost, the growth of a pingo-like feature, which is essentially a mud volcanic structure, begins on the arch of the uplift. Fluid flow within a vertical channel up to the summit crater may be accompanied by freezing of the clayey strata as a result of the throttling effect. Mud flowing from the summit crater can freeze on the slopes of a pingo-like feature as a result of cooling of the fresh water contained in them under conditions of subzero bottom temperatures. A growth of the mud volcanic structure leads to a decrease in pressure near the base of submarine permafrost, that gradually thaws under the influence of fluid flow. This process leads to the gradual subsidence of roll-like rise and the appearance of compensation depressions. Based on the results of repeated monitoring of gas manifestations in water, it was established that more than half of the pingo-like features are currently active channels for the migration of fluids from the subsurface to the bottom surface and into the water column.

Keywords: degassing, fluids, fluidogenic landforms, mud volcanism, diapirs, acoustic anomalies, Barents Sea

ACKNOWLEDGMENTS

Interpretation of the results of expeditionary work and the development of conceptual scheme were supported

by the Russian Science Foundation project № 22-77-10091 “Spatial Patterns of Degassing Manifestation on the Barents-Kara Shelf and Its Influence on the Relief and Bottom Sediments”.

¹ *For citation:* Eremenko E. A., Kokhan A. V., Moroz E. A. et al. (2024). Pingo-like features in the Pechora Sea: conditions, origin and stages of development. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. V. 55. № 2. P. 138–153. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2949178924020075>; <https://elibrary.ru/PNPYQE>

REFERENCES

- Atlas: geology and minerals of the Russian shelves (Atlas: geologija i poleznye iskopaemye shel'fov Rossii). (2004). Moscow: GIN RAN (Publ.). 108 p. (in Russ.)
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. (2013). 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development. *Geol. Surv. Can. Open File* 6989. 340 p. <https://doi.org/10.4095/292616>
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. (2018). Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*. V. 8. № 12. 453. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453>
- Bondarev V. N., Rokos S. I., Kostin D. A. i dr. (2002). Sub-permafrost gas accumulations in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea. *Geologija i geofizika*. Iss. 43. № 7. P. 587—598. (in Russ.)
- Denisova A. P., Moroz E. A., Eremenko E. A. et al. (2022). Signs of degassing within the glacial shelf in the north-eastern part of the Barents Sea. In: *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii*. Vyp. 9. Saint-Petersburg: VNIIOkeangeologija im. I. S. Gramberga (Publ.). P. 78—86. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-78-86/>. (in Russ.)
- Diak M., Böttcher M. E., Ehlert von Ahn C. M. et al. (2023). Permafrost and groundwater interaction: current state and future perspective. *Front. Earth Sci.* V. 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1254309>
- Frederick J. M., Buffett B. A. (2016). Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf. *J. Geophys. Res. Solid Earth*. V. 121. Iss. 3. P. 1383—1404. <https://doi.org/10.1002/2015JB012627>.
- Frederick J. M., Buffett B. A. (2015). Effects of submarine groundwater discharge on the present-day extent of relict submarine permafrost and gas hydrate stability on the Beaufort Sea continental shelf. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* V. 120. Iss. 3. <https://doi.org/10.1002/2014JF003349>
- Grob H., Riedel M., Duchesne M. J. et al. (2023). Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators. *Geochem., Geophys., Geosyst.* V. 24. Iss. 5. e2023GC010884. <https://doi.org/10.1029/2023GC010884>
- Gwiazda R., Paull C. K., Dallimore S. R. et al. (2018). Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea. *Geochem., Geophys., Geosyst.* V. 19. Iss. 9. P. 3039—3055. <https://doi.org/10.1029/2018GC007623>
- Hant J. (1982). *Geokhimiya i geologiya nefti i gaza* (Geochemistry and geology of oil and gas). Moscow: MIR (Publ.). 706 p. (in Russ.)
- Kokhan A. V., Moroz E. A., Eremenko E. A. et al. (2022). Morphology of pingo-like features on the shelf of the Pechora and Kara seas as an indicator of their age and dynamics. In: *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii*. Vyp. 9. Saint-Petersburg: VNIIOkeangeologija im. I. S. Gramberga (Publ.). P. 143—148. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2022-9-143-148> (in Russ.)
- Kokhan A. V., Moroz E. A., Eremenko E. A. et al. (2023). Fluidogenic landforms within the permafrost zone on the shelf of the Pechora and Kara seas. *Lomonosov Geogr. J.* V. 78. No. 3. P. 104—124. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9>. (in Russ.)
- Krapivner R. B. (2007). Signs of neotectonic activity of the Barents Sea shelf. *Geotektonika*. № 2. P. 73—89. (in Russ.)
- Mel'nikov V. P., Fedorov K. M., Vol'f A. A., Spesivcev V. I. (1998). Analysis of a possible scenario for the formation of bottom ice mounds on the Pechora Sea shelf. *Kriosfera Zemli*. Iss. 11. № 4. P. 51—57. (in Russ.)
- Mel'nikov V. P., Spesivcev V. I. (1995). *Inzhenerno-geologicheskie i geokriologicheskie usloviya shel'fa Barentseva i Karskogo morei* (Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara Seas). Novosibirsk: Nauka. Sib. otdelenie (Publ.). 194 p. (in Russ.)
- Metodicheskoe rukovodstvo po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii mashtaba 1:1 000 000 (tret'ego pokoleniya) (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). Saint-Petersburg: VSEGEI (Publ.). 198 p. (in Russ.)
- Mironyuk S. G. (2020). Fluidogenic formations: justification for identifying a new genetic group of seabed relief. In: *VIII Shchukinskiye chteniya: rel'ef i prirodopol'zovanie. Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. Moscow: MGU (Publ.). P. 37—43. (in Russ.)
- Mironyuk S. G., Ivanova A. A., Khlebnikova O. A. (2019a). Fluidogenic landforms as indicators of oil and gas potential of the shelf subsurface. In: *Trudy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskije issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2018)"*. V. II (IV). Tver': PolipRESS (Publ.). P. 120—125. (in Russ.)
- Mironyuk S. G., Kolyubakin A. A., Golenok O. A. et al. (2019b). Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure. In: *Geologiya morei i okeanov: Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii*. Moscow: IO RAN (Publ.). Iss. 5. P. 192—196. (in Russ.)
- Overduin P., Von Deimling T. S., Miesner F. et al. (2019). Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). *J. Geophys. Res.: Oceans*. V. 124. Iss. 6. P. 3490—3507. <https://doi.org/10.1029/2018JC014675>
- Paull C. K., Dallimore S. R., Jin Y. K. et al. (2022). Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *PNAS*. V. 119. № 12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>
- Paull C. K., Lii W. U., Dallimore S. R. et al. (2007). Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. *Geophys. Res. Lett.* V. 34. L01603. <https://doi.org/10.1029/2006GL027977>
- Poley D. F. (1982). A detailed study of a submerged pingo-like feature in the Canadian Beaufort Sea (Arctic, Canada). Dalhousie University, Department of Geology. 105 p.

- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. (2013). Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20m at the South Kara Sea shelf. *Geophys. Res. Lett.* V. 40. <https://doi.org/10.1002/grl.50735>
- Rokos S.I. (1996). Stratigraphy and geochronology of Quaternary sediments of the shallow shelf of the Pechora and Kara seas according to engineering-geological drilling data. In: *Tezisy mezhdunarodnoi konferentsii "Evoljucija biologicheskikh protsessov i morskije ekosistemy v usloviyakh okeanicheskogo periglyatsiala"*. Murmansk: ММБИ (Publ.). P. 22—23. (in Russ.)
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. (2015). Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* V. 120. Iss. 8. P. 1515—1529. <https://doi.org/10.1002/2015JF003467>
- Shearer J. M., Macnab R. F., Pelletier B. R., Smith T. B. (1971). Submarine pingoes in the Beaufort Sea. *Science*. V. 174. № 4011. P. 816—818.
- Sistema Barentseva morya (Barents Sea system). (2021). A. P. Lisicyna (Ed.). Moscow: GEOS (Publ.). 671 p. (in Russ.)
- Van Rensbergen P., Rabaute A., Colpaert A. et al. (2007). 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. *Int. J. Earth Sci.* V. 96. Iss. 1. P. 185—197. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0021-2>
- Weatherall P., Marks K. M., Jakobsson M. et al. (2015). A new digital bathymetric model of the world's oceans. *Earth and Space Sci.* V. 2. Iss. 8. P. 331—345. <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>