

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.46

ФЛЮИДОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ РАЙОНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА ШЕЛЬФЕ ПЕЧОРСКОГО И КАРСКОГО МОРЕЙ

А.В. Кохан¹, Е.А. Мороз², Е.А. Еременко³, А.П. Денисова⁴, Р.А. Ананьев⁵, Е.А. Сухих⁶,
С.Л. Никифоров⁷, С.Ю. Соколов⁸, А.А. Разумовский⁹

^{1–4,8} Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов

^{3,4} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,
кафедра геоморфологии и палеогеографии

^{5,7} Институт океанологии РАН, лаборатория сейсмостратиграфии

⁶ Геологический институт РАН, лаборатория теплопереноса

⁹ Геологический институт РАН, лаборатория геологии складчатых поясов

¹ Мл. науч. сотр.; e-mail: kkkkk1987@mail.ru

² Ст. науч. сотр.; e-mail: morozzea@gmail.com

³ Доц.; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

⁴ Лаборант, студент; e-mail: anden6900@gmail.com

⁵ Науч. сотр.; e-mail: corer@mail.ru

⁶ Науч. сотр.; e-mail: sukhikh_ea@mail.ru

⁷ Гл. науч. сотр.; e-mail: nikiforov@ocean.ru

⁸ Гл. науч. сотр.; e-mail: sysokolov@yandex.ru

⁹ Науч. сотр.; e-mail: anatoly.razumovskiy@mail.ru

По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненных в рамках пяти рейсов научно-исследовательских судов «Академик Николай Страхов» и «Академик Борис Петров» в 2018–2022 гг., установлены закономерности изменения морфометрических параметров и внутреннее строение пингоподобных форм на шельфах Печорского и Карского морей. Проведен морфометрический анализ пингоподобных форм, позволивший сделать выводы об их относительном возрасте, а также степени участия деятельности придонных течений и склоновых процессов в их современной динамике. Выявлено, что плотность и морфологическое разнообразие пингоподобных форм зависят от геолого-тектонической позиции участка дна, наличия и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления шельфа в ходе голоценовой трансгрессии. На участках шельфа, где глубина превышает 70–80 м, эти формы были образованы на ранних стадиях голоценовой трансгрессии, и к настоящему моменту многолетнемерзлые породы там уже в значительной степени оттаяли. В то же время пингоподобные формы сохраняют свою выраженность в рельефе и активно преобразуются деятельностью придонных течений, склоновыми и, возможно, псевдовулканическими процессами, связанными с продолжающейся дегазацией. На мелководных (до 20–30 м), близких к берегу участках шельфа пингоподобные формы редки и, по-видимому, продолжают формироваться в настоящее время. При этом большая мощность и сплошность многолетнемерзлых пород препятствуют активному флюидопотоку, играя роль флюидоупора. Для пингоподобных форм мелководья характерна морфология конусообразных бугров и отсутствие признаков интенсивного выхода газов. На промежуточных глубинах (от 20–30 до 70–80 м) при наличии островной или прерывистой многолетней мерзлоты в условиях высокой интенсивности потока флюидов в районе разломных зон и нефтегазоперспективных структур плотность пингоподобных форм максимальна. На таких участках в приповерхностной толще осадков сочетаются продолжающиеся местами процессы пучения и активная дегазация, что предопределяет широкое разнообразие морфологических типов пингоподобных поднятий.

Ключевые слова: Арктика, рельеф дна, дегазация, пингоподобные формы, акустические аномалии, многолучевое эхолотирование, непрерывное сейсмоакустическое профилирование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9

ВВЕДЕНИЕ

Шельфовая зона Северного Ледовитого океана является наиболее изученной его частью, однако и здесь осталось еще немало белых пятен, требующих детальных исследований. Одно из них – явление дегазации и создаваемый им рельеф. Дегазация – процесс поднятия флюидов, в основном метана, из недр Земли вверх по разрезу к поверхности дна и в водную толщу [Judd, Novland, 2007], приводящий к газонасыщению осадочного чехла, образованию флюидогенного рельефа (предложен к выделению в качестве особого генетического типа субаквального рельефа дна в работе [Миронюк, 2020]) и появлению взвести в воде. Флюидогенный рельеф на арктических шельфах России представлен покмарками (rockmarks), пингоподобными формами (pingo-like features), а также псевдовулканическими образованиями, описанию которых посвящено немало научных работ [Миронюк и др., 2019; Миронюк, 2020; Paull et al., 2007; Serov et al., 2015; Shearer et al., 1971]. В то же время остаются дискуссионными вопросы, связанные с причинами дегазации и источниками флюидов, а также характером взаимосвязи между геолого-тектоническим строением, геокриологическими условиями, интенсивностью дегазации и морфологией флюидогенного рельефа. Объектом исследования в настоящей работе являлись пингоподобные формы (ППФ), распространенные на шельфах морей Печорского и Карского, а целью – детальная характеристика морфологических параметров ППФ, оценка их современной динамики и выявление связи между перечисленными свойствами, условиями и факторами развития рельефа дна.

В сравнении с другими флюидогенными формами, ППФ до сих пор остаются слабоизученными. Согласно имеющимся представлениям [Бондарев и др., 2002; Миронюк и др., 2019; Paull et al., 2022; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015], образование ППФ обусловлено выделением газов, связанных с таянием субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП) и внутри- и подмерзлотных газогидратов, а также подъемом к поверхности глубинных термогенных газов. ППФ были впервые обнаружены на континентальном шельфе моря Бофорта в 1969 г. [Shearer et al., 1971]. На основании морфологических признаков они были интерпретированы как реликтовые (субаэральные) криогенные бугры пучения. В ходе дальнейших исследований была отмечена их приуроченность к бровке шельфа и разломным зонам в его внутренней части, где ММП характеризуются островным распространением и выклиниваются [Paull et al., 2007, 2022]. Установлено, что ППФ сложены супесчаными и песчаными грунтами, тальми твердыми и полутвердыми

суглинками, а также сильнольдистыми суглинками и ледогрунтами с льдистостью от 10–30 до 70–90% [Paull et al., 2007]. В осевой части ППФ зачастую наблюдались газовые факелы, молекулярный состав и изотопия углерода в составе метана газовых выбросов свидетельствовали о происхождении газа из подмерзлотных и внутримерзлотных газогидратных залежей [Paull et al., 2007]. Было сделано предположение, что таяние газогидратов привело к формированию зон аномально высокого пластового давления и вовлечению пластичных высокольдистых отложений в движение вверх по разрезу по ослабленным зонам и участкам пониженной мощности ММП [Paull et al., 2007]. Последующее опробование пород дна и съемки с применением подводных автономных и телеуправляемых аппаратов показали, что на глубинах 100–130 м формируются ППФ, генезис которых, возможно, связан с поступлением грунтовых вод с суши (из бассейна р. Маккензи) вдоль подошвы ММП к кромке шельфа, растеплением и таянием мерзлоты [Paul et al., 2021].

В акватории морей российского сектора Арктики ППФ были впервые обнаружены и обследованы в ходе работ ГУП «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (АМИГЭ) в 1988 г. в северо-восточной части Печорского моря [Бондарев и др., 2002]. В 1995–1996 гг. здесь же было выполнено бурение, сейсмопрофилирование и гидролокация на площади 5×5 км. По данным непрерывного сейсмического профилирования установлено, что ППФ сложены осадками акустически непрозрачного сейсмокомплекса, в то время как в пределах разделяющих их компенсационных впадин акустический сигнал поглощался полностью. Бурение ППФ показало, что акустически непрозрачный сейсмокомплекс представлен сильнольдистыми казанцевскими суглинками и глинами с убыванием льдистости от 90% в приповерхностной до 30% в нижней части разреза. В вершинной части одной из пингоподобных форм была вскрыта зона аномально высокого пластового давления в зырянских песках, подстилающих каргинские глины и суглинки. В результате мощного аварийного выброса газо-грунтово-водяной смеси бурение было прекращено, и образовалась воронка, сохранившаяся в рельефе дна и по настоящее время [Тулапин и др., 2021]. По результатам этих работ В.Н. Бондаревым и соавторами [Бондарев и др., 2002] было высказано предположение, что толща субаквальных ММП, сложенная преимущественно сильнольдистыми пластичномерзлыми казанцевскими глинами, формировала непроницаемую покрывку, блокирующую миграцию газо-водного флюида к поверхности. На участке ослабленных зон (в том числе, в результате таяния ММП снизу) происходило выжи-

мание толщи пластичномерзлых казанцевских глин к поверхности с формированием ППФ.

Одним из возможных механизмов формирования льдистых пород, слагающих ППФ Печорского моря, может являться воздействие термогенных газов на донные осадки [Мельников и др., 1998]. Высвобождаясь из глубинных нефтегазогенерирующих структур и фильтруясь в верхние слои разреза, газ мог промораживать слабосцементированные водонасыщенные породы за счет его расширения и дроссельного эффекта Джоуля–Томпсона, приводящего к падению температуры в грунте. Результаты теплофизических расчетов показывают [Мельников и др., 1998], что в ходе этого процесса под ППФ формируется колонна ледонасыщенных грунтов с убыванием льдистости вниз по разрезу.

Однако не все исследователи ППФ Печорского моря склонны связывать их образование с дегазацией в условиях наличия ММП. В частности, по мнению Р.Б. Крапивнера [2007], происхождение ППФ может быть обусловлено диапиризмом по глубинным разломам и грязевым вулканизмом на поверхности дна. Глинисто-ледяные отложения, вскрытые скважинами по данным [Бондарев и др., 2002], он интерпретирует как жерловую фацию выраженных в рельефе дна грязевых вулканов [Крапивнер, 2007].

В акватории Карского моря в диапазоне глубин от 5–10 до 45 м были выполнены региональные съемочные работы (высокочастотное профилирование, опробование поверхностных грунтов) [Portnov et al., 2013], в ходе которых установлена относительно невысокая встречаемость ППФ в этом районе. Высота выявленных ППФ составила не более 5 м, диаметр изменялся от 30–40 до 400–500 м [Serov et al., 2015]. По результатам изотопного анализа метана из кернов отложений, слагающих ППФ в юго-восточной [Semenov et al., 2020] и северной частях Карского моря [Serov et al., 2015], установлено, что газ может иметь как глубинное происхождение, связанное с таянием подмерзлотных и внутримерзлотных газогидратов, так и приповерхностное, связанное с таянием ММП. Так как именно газ глубинного происхождения характеризовался значительными концентрациями в осадках, тогда как содержание приповерхностного метана было мало, высказано предположение, что образование ППФ, скорее, связано с глубинным флюидопотоком [Serov et al., 2015].

Таким образом, несмотря на достаточно широкое распространение ППФ на арктических шельфах, общепринятой концепции о механизме их образования до сих пор нет. Дальнейшее изучение ППФ представляет интерес как с прикладной, так и с фундаментальной точек зрения. Так, на участках продолжающейся дегазации ППФ являются источ-

ником риска нарушения работ при бурении скважин, строительстве и эксплуатации нефтегазопромысловой инфраструктуры. Кроме того, анализ дебита и состава флюидов в зонах развития ППФ важен с точки зрения мониторинга глобальных последствий изменения климата, эволюции субаквальных ММП и изучения процессов глубинной дегазации Земли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфология ППФ и строение верхней части осадочного разреза шельфа в районах их распространения изучались в ходе комплексных геолого-геофизических работ на полигонах в центральной части Печорского моря площадью около 150 км² (полигон 1), в центральной части Карского моря площадью около 40 км² (полигон 2) и в западной части Байдацкой губы площадью около 6 км² (полигон 3) (рис. 1). Экспедиционные работы выполнены авторами в рамках 38-го (2018 г.), 41-го (2019 г.), 49-го (2020 г.) и 52-го (2021 г.) рейсов НИС «Академик Николай Страхов», а также 51-го (2022 г.) рейса НИС «Академик Борис Петров» в рамках программы «Геолого-геофизические, геоморфологические и гидрофизические исследования в Баренцевом и Карском морях» (руководитель проекта – д-р геогр. наук С.Л. Никифоров).

Для сбора данных применялся программно-аппаратный комплекс, включающий многолучевой эхолот SeaBat 8111; GPS, сенсоры движения и гироскоп, объединенные в приборе Applanix POS-MV; датчик скорости звука SVP-70; высокочастотный профилограф EdgeTech 3300 (разрешающая способность – 0,1–1 м, глубина проникновения акустического сигнала – 10–100 м). Съемка выполнялась по сетке галсов (межгалсовое расстояние – 200 м) с одновременной работой многолучевого эхолота, высокочастотного профилографа и системы сейсмоакустического профилирования.

На камеральном этапе обработка данных многолучевого эхолотирования выполнялась в программном пакете PDS2000 с построением цифровых моделей рельефа дна разрешением 2×2 и 10×10 м (на полигоне 1) и 10×10 м (на полигонах 2 и 3). С использованием цифровых моделей рельефа дна определены морфометрические параметры ППФ: высота, длина, ширина, площадь основания, периметр, ориентировка (для удлиненных форм). Расчет статистических показателей и построение графиков проводились в MS Excel. Обработка сейсмических данных проводилась в программе RadExPro, для интерпретации и визуализации использовались программы SeiSee и Kingdom Software 8.3. Сводный анализ и интерпретация геолого-геофизических данных выполнялись в свободно распространяемом пакете QGIS 3.22.

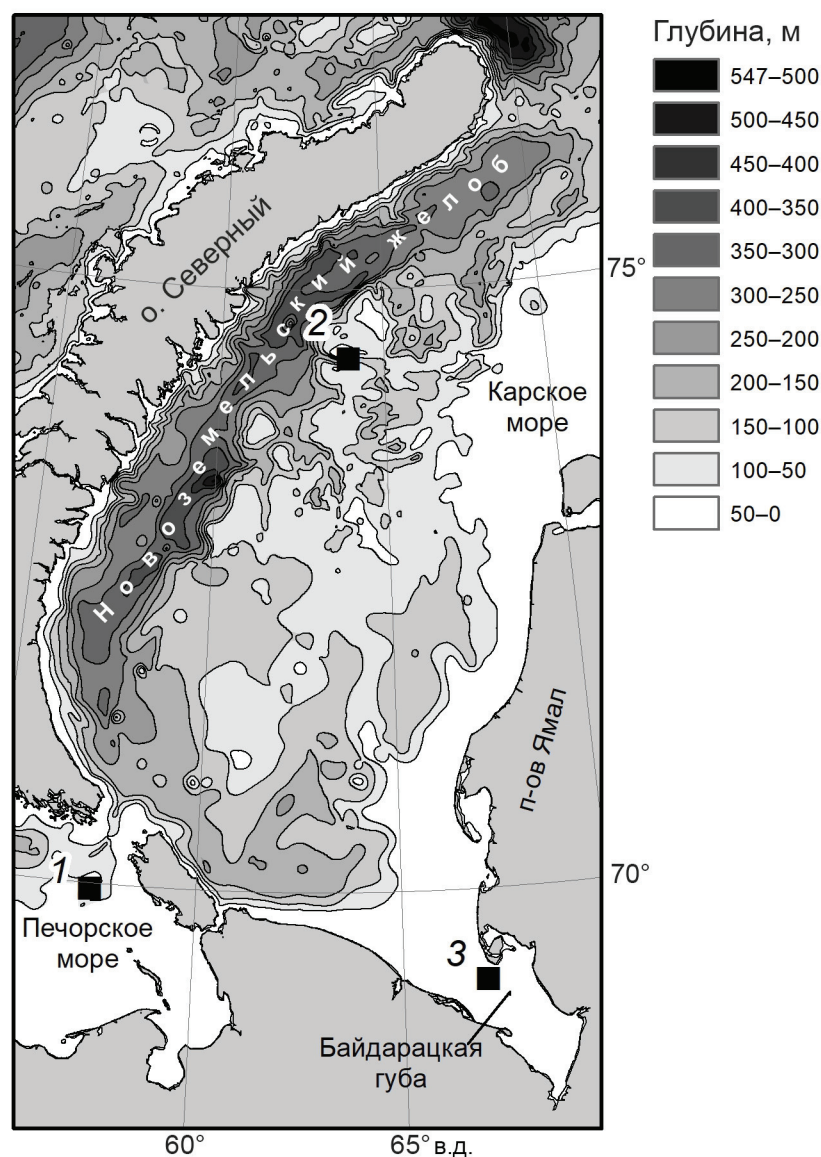


Рис. 1. Расположение полигонов исследования: 1 – полигон 1 (Печорское море); 2 – полигон 2 (Карское море); 3 – полигон 3 (Байдарацкая губа). Изобаты проведены по данным цифровой модели GEBCO [www.gebco.net/data...]

Fig. 1. Location of study sites: 1 – polygon 1 (Pechora Sea); 2 – polygon 2 (Kara Sea); 3 – polygon 3 (Baydaratskaya Bay). The isobaths were drawn according to the GEBCO digital model [www.gebco.net/data...]

Для использования при анализе и интерпретации результатов экспедиционных исследований собраны и систематизированы опубликованные отечественные и зарубежные работы по изучаемой проблематике, выполнен подбор и привязка в геоинформационной системе (ГИС) геологических, геофизических и геоморфологических карт и схем разного масштаба на изучаемые участки шельфа. Для анализа рельефа окрестностей изучаемых полигонов использовалась цифровая модель рельефа GEBCO_2014 версии 20141103 [GEBCO_2014..., 2022].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

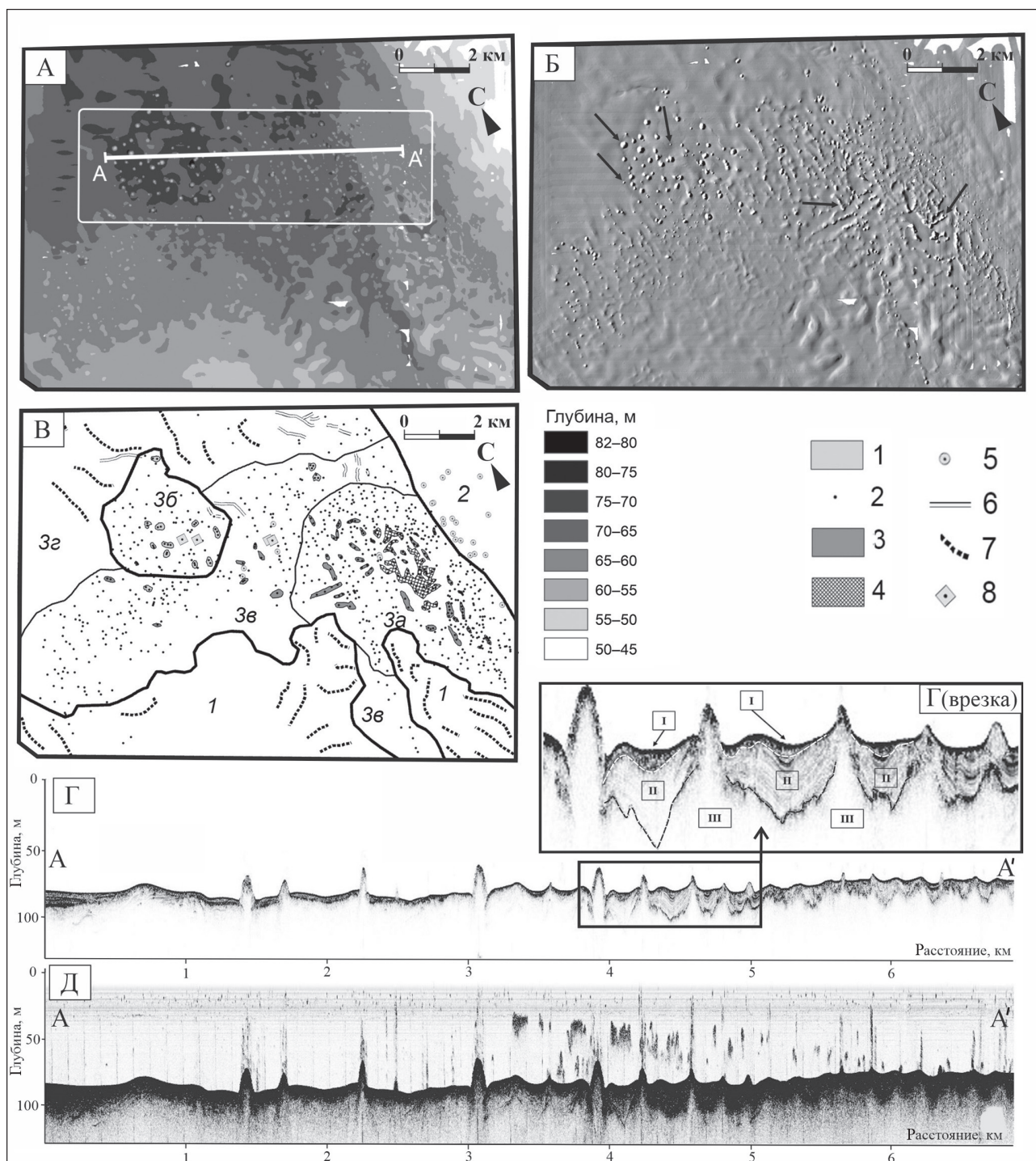
Полигон 1 располагается во внешней части Печороморского шельфа и характеризуется в целом вы-

ровненным рельефом дна. В ходе 38-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в 2018 г. на полигоне 1 было выполнено многолучевое эхолотирование и высокочастотное профилирование, позволившие с высокой детальностью охарактеризовать морфологию и геологическое строение ППФ. В центральной части обследованного полигона (см. рис. 1) располагается площадь размером около 5×5 км, исследованная в ходе работ АМИГЭ в 1988 и 1995–1996 гг. [Бондарев и др., 2002].

Глубины в пределах полигона изменяются от 47 до 82 м (рис. 2А). Он захватывает пологосклонное понижение дна видимой длиной около 20 км, протягивающееся с ЮЮВ на ССЗ, сужающееся и раздваивающееся в юго-восточной части участка. Относи-

тельная глубина его составляет 25–30 м, ширина по нечетким плавным бровкам от 6–8 км у южной границы полигона до 20–25 км на севере. Территория расположена на стыке двух макроформ рельефа дна: большая часть располагается в границах абразионно-аккумулятивной неоген-раннечетвертичной холмисто-западинной морской равнины (глубины более 50–55 м) со следами допоздненеоплейстоценовой субэаральной переработки. В южной и восточной частях выделяются фрагменты поздненеоплейстоцено-голоценовой аккумулятивно-абразионной равнины (глубины менее 50–55 м) [Бирюков и др., 2008].

Общий выровненный рельеф поверхности дна осложнен 840 ППФ изометричной или удлинённой формы в плане с щитовидным, куполовидным или коническим поперечными профилями. ППФ сосредоточены в центральной и, отчасти, северной пониженных частях полигона и сгруппированы в кластеры. В восточной части полигона их плотность максимальна и достигает 35–45 шт./км², в других частях она составляет 20–25 шт./км² (рис. 3Л). Высота ППФ составляет от 1,5–3 до 20–25 м, диаметр (или длинная ось для вытянутых форм) – от 20–30 до 300–430 м.



На основе результатов морфометрического анализа ППФ установлено наличие трех морфологических типов (см. рис. 3, 4).

ППФ *первого типа* располагаются на ровном дне. Это самые крупные формы с диаметром от 100 до 250 м, высотой от 12–15 до 20–25 м, округлыми очертаниями в плане, как правило обладающие компенсационными понижениями по контуру (глубиной от 1 до 3–4 м) (см. рис. 3А). Зачастую в их вершинных частях наблюдаются воронки глубиной до 1–1,5 м, склоны ППФ крутизной от 10–15 до 25–35° осложнены натечными псевдотеррасами. Характерно образование кластеров в виде двух-трех слившихся или непосредственно примыкающих друг к другу форм без четко выраженного общего основания.

ППФ *второго типа* (см. рис. 3Б) также располагаются на ровном дне, однако это менее крупные формы с диаметром от 35–50 до 120–170 м, высотой от 5–7 до 10–12 м, редко бывают окружены компенсационными впадинами. Крутизна склонов форм не превышает 10–15°.

Похожими на ППФ второго типа, но существенно более мелкими являются ППФ *третьего типа* (рис. 3В). Высота их до 5–7 м, диаметр – 100–120 м, крутизна склонов – до 10–15°. В некоторых случаях соседние ППФ сливаются в единое грядобразное поднятие (крутизна склонов – 10–15°), длина основания которого изменяется от 200–300 до 700–800 м, высота поднятий вместе с основанием может достигать 50–70 м (см. рис. 3Д). В восточной части полигона в днище ложбинообразного понижения дна плотность ППФ заметно возрастает, и здесь встречаются крупные, с причудливой в плане формой поднятия дна с надстроенными на них грядами, описанными выше, и отдельными изометричными ППФ высотой до 15–20 м. Крутизна уступов таких крупных поднятий нередко достигает 25–35°

(см. рис. 3Г). В центральной и восточной частях полигона отмечается наличие асимметрии склонов и удлиненности ППФ, связанных, по-видимому, с накоплением осадков, переносимых придонными течениями с юга на север (ППФ выступают преградой на пути переноса материала).

Результаты морфометрического анализа демонстрируют полимодальное распределение ППФ по высоте и наличие трех основных типов, выделенных выше (см. рис. 4В). Зависимость между высотой ППФ и площадью их основания близка к линейной (см. рис. 4А) (коэффициент корреляции $r = 0,68$). Удлиненные ППФ ориентированы преимущественно субмеридионально (азимут 155–225°; см. рис. 4А), при этом установлена слабая связь между высотой ППФ и коэффициентом их удлиненности ($K_{удл}$): вытянутость более характерна для небольших форм второго и третьего типов (см. рис. 4В).

В восточной части полигона и реже в других его частях рельеф дна осложнен покмарками (газовыми грифонами), представляющими собой изометричные замкнутые блюдцеобразные понижения с нечеткими бровками глубиной 1–2 м, диаметром до 70–100 м. Необходимо отметить, что в целом покмарки крайне редки на участках распространения ППФ.

По результатам высокочастотного акустического профилирования в строении дна выявлены три сейсмостратиграфических комплекса (ССК) (см. рис. 2Г (врезка)), согласующихся со схемой стратиграфии полигона, предложенной в работе [Бондарев и др., 2002]:

1) залегающий с поверхности ССК I с хаотической высокоамплитудной записью мощностью от 1–2 до 15–25 м (морские голоценовые и/или позднеоплейстоценовые (сарганские) суглинки ($mQ_3^4-Q_4$));

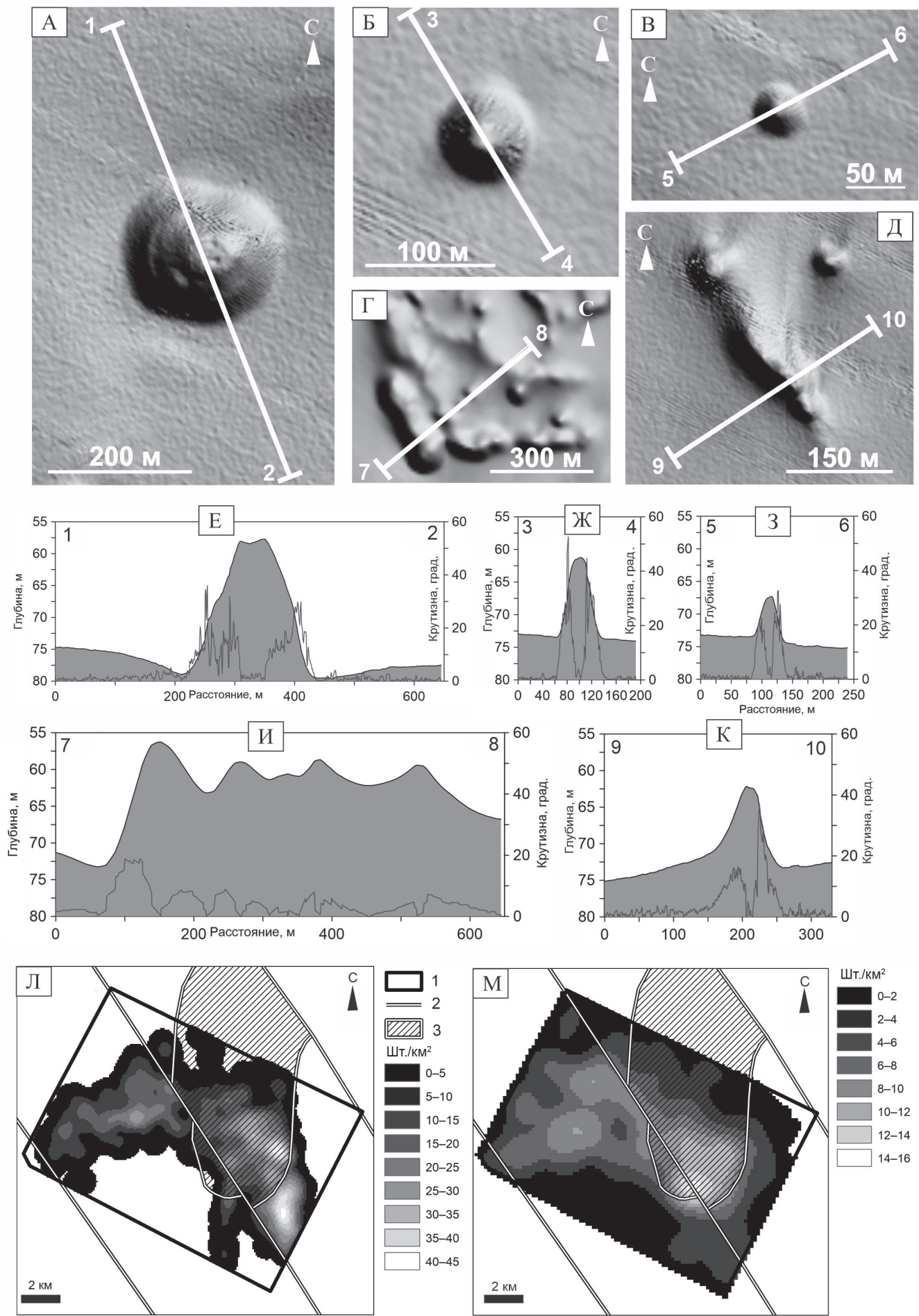
2) акустически слоистый ССК II мощностью от 5–10 до 20–25 м (аллювиально-морские позднеоплейстоценовые (сарганские) пески и суглинки (amQ_3^4));

Рис. 2. Пингоподобные формы центральной части Печорского моря (полигон 1):

А – цифровая модель рельефа (по данным 38-го рейса НИС «Академик Николай Страхов», 2018 г., рамкой выделена область, для которой выполнен морфометрический анализ ППФ); Б – цифровая модель с отмывкой (стрелки указывают на ППФ, профили которых приведены на рис. 3); В – схема районирования территории по морфологии ППФ (цифрами показаны номера геоморфологических районов и подрайонов, упоминаемых в тексте); Г – профиль, полученный методом высокочастотного акустического профилирования по линии А–А' (I, II, III – сейсмостратиграфические комплексы, упоминаемые в тексте); Д – то же, с применением программного усиления. Условные обозначения: 1 – группы ППФ первого типа; 2 – отдельные ППФ разных типов; 3 – грядобразные формы, образованные слиянием нескольких ППФ; 4 – крупные массивы, образованные слиянием нескольких ППФ; 5 – покмарки; 6 – каналы, образованные течениями; 7 – оси валообразных поднятий дна; 8 – скважины, пробуренные на полигоне по данным [Бондарев и др., 2002]

Fig. 2. Pingo-like forms in the central part of the Pechora Sea (polygon 1):

А – digital elevation model (according to the data of the 38th cruise of the R/V Akademik Nikolai Strakhov, 2018; the area for which the PLF morphometric analysis was performed is highlighted); Б – digital model with hillshade (arrows point to PLF, the profiles of which are shown in Fig. 3); В – zoning scheme of the territory according to PLF morphology (numbers show the numbers of geomorphologic regions and subregions mentioned in the text); Г – profile obtained by high-frequency acoustic profiling along the А–А' line (I, II, III – seismostratigraphic complexes mentioned in the text); Д – the same, with program amplification. Legend: 1 – groups of PLFs of the first type; 2 – individual PLFs of different types; 3 – ridge-shaped forms resulting from the merger of several PLFs; 4 – large massifs formed by the merger of several PLFs; 5 – pockmarks; 6 – channels formed by currents; 7 – axes of ridge-like rises of the bottom; 8 – wells drilled at the polygon according to (Bondarev et al., 2002)



3) акустически непрозрачный ССКШ, кровля которого представляет собой сложно построенную систему отражений различной геометрии и имеет сложный рельеф (ассоциируется с кровлей мерзлых сильнольдистых позднеоуплейстоценовых (казанцевских) глин и суглинков (mQ_3^{1-3})).

Отложения ССКІ залегают во впадинах в окрестностях ППФ, плащеобразно облекают неровности рельефа кровли ССКШ. В западной части полигона, где плотность ППФ снижается или они вовсе отсутствуют, мощность ССКІ достигает 20–25 м. В восточной части полигона отложения ССКІ наблюдаются в виде отдельных пачек на дне мощностью до 1–5 м. Отложения ССКШ распространены на полигоне повсеместно и не установлены только под самими ППФ. Эти осадки облекают неровный рельеф поверхности кровли ССКШ с высокоамплитудным (от 4–5 до 35–40 м ниже дна) рельефом кровли. Отложения ССКШ обнажаются на дне, слагая с поверхности ППФ разных морфологических типов (см. рис. 2Г).

По результатам высокочастотного сейсмоакустического профилирования на полигоне 1 выявлено 608 акустических аномалий, приуроченных, в основном, к районам распространения ППФ на дне. К вершинным поверхностям и склонам ППФ первого типа приурочены вертикальные аномалии типа газовых факелов (см. рис. 2Д). Для других типов ППФ акустические аномалии в водной толще выявлены в виде разрозненных хаотичных структур как над самими формами, так и между ними. Газопроявления в центральной части территории приурочены к участкам с высокой плотностью ППФ первого типа, плотность акустических аномалий в водной толще достигает здесь 5–7 шт./км² (см. рис. 3М). В восточной части полигона, где сочетаются ППФ третьего типа, а также массивы ППФ, плотность аномалий возрастает до 12–14 шт./км².

Выявленные закономерности позволяют выделить в пределах полигона три района, различающихся по перечисленным параметрам (см. рис. 2В).

Район 1 охватывает возвышенность в южной части полигона. Морфологически это пологий (менее

2°), местами пологоволнистый уступ позднеоуплейстоцен-голоценовой аккумулятивно-абразионной равнины. Глубина составляет 55–65 м. ППФ и газопроявления в воде здесь практически не встречаются. С поверхности дна практически повсеместно в виде покрова залегают отложения ССКІ мощностью от 2–3 до 5–7 м. Поднятия кровли ССКШ, залегающей на глубинах от 5–10 до 20–25 м, трассируются фрагментарно.

Район 2 – это пологий уступ (2–3°) позднеоуплейстоцен-голоценовой аккумулятивно-абразионной равнины в восточной части полигона. Глубина составляет 47–65 м. Рельеф дна осложнен покмарками, приуроченными к подножью уступа. Близ подножья уступа группируются и немногочисленные газопроявления, выявленные в водной толще. При этом пространственной взаимосвязи между газопроявлениями и покмарками не прослеживается. В пределах района 2 отложения ССКШ залегают на глубине до 5–7 м под маломощным чехлом преимущественно ССКШ и линзами ССКІ. Кровля ССКШ относительно выровненная.

Район 3 занимает большую часть полигона и приурочен к плоской поверхности морской неоген-раннечетвертичной равнины с глубинами от 55–60 до 75–80 м. Это основной ареал развития ППФ и газопоявлений в водной толще. По плотности и морфологии ППФ район 3 может быть дополнительно разделен на несколько подрайонов.

Подрайон 3а характеризуется глубиной от 60–65 до 75–77 м и присутствием всех типов поднятий и массивов ППФ (плотность их достигает 35–45 шт./км²). Плотность акустических аномалий, связанных с дегазацией, максимальна и достигает 10–15 шт./км². Отложения ССКШ залегают на небольшой глубине и нередко обнажаются на поверхности, слагая ППФ разных типов. Во впадинах они залегают на глубинах до 30–45 м, что создает высокую контрастность рельефа кровли ССКШ в пределах данного подрайона.

Подрайон 3б приурочен к наиболее глубокой части макроронжирования рельефа полигона (глубина достигает 80–82 м). Здесь сосредоточена большая часть наиболее крупных ППФ первого

Рис. 3. Морфология и плотность пингоподобных форм.

Типы строения ППФ: А – первый; Б – второй; В – третий; Г – массив, образованный слиянием ППФ; Д – гряда, образованная слиянием ППФ; Е–К – поперечные профили через ППФ (линией на профилях показана крутизна поверхности); Л – плотность ППФ на полигоне 1; М – плотность газопоявлений в воде на полигоне 1.

Условные обозначения: 1 – границы полигона 1; 2 – разломы (по данным ГГК [Вискунова и др., 2003]); 3 – границы нефтегазоперспективной структуры Рейнекская (по данным ГГК [Вискунова и др., 2003])

Fig. 3. Morphology and density of pingo-like forms.

Types of PLF structure: A – the first; Б – the second; В – the third; Г – a massif formed by the merger of PLFs; Д – ridge formed by the merger of PLFs; Е–К – transverse profiles through the PLF (the line on the profiles shows the surface steepness); Л – PLF density at the polygon 1; М – density of gas shows in water at the polygon 1.

Legend: 1 – boundaries of the polygon 1; 2 – faults (according to GGC [Viskunova et al., 2003]); 3 – boundaries of the Reynekskaya oil and gas prospective structure (according to GGC [Viskunova et al., 2003])

типа (относительная высота до 25 м, поперечник – до 250 м, плотность – до 25–40 шт./км²). ППФ зачастую окружены компенсационными впадинами шириной по бровкам до 100–120 м и относительной глубиной до 2–3 м. Для компенсационных впадин характерна асимметрия склонов: более крутые (10–15° против 2–4°) борта обращены к ППФ. От-

мечаются сопутствующие ППФ газопроявления, но плотность их сравнительно невелика (6–10 шт./км²). Кровля отложений ССКIII установлена на глубинах до 35–40 м и в разделяющих ППФ впадинах прослеживается фрагментарно. Впадины между поднятиями заполнены толщей отложений ССКI мощностью до 20–25 м и ССКII мощностью до 10–15 м.

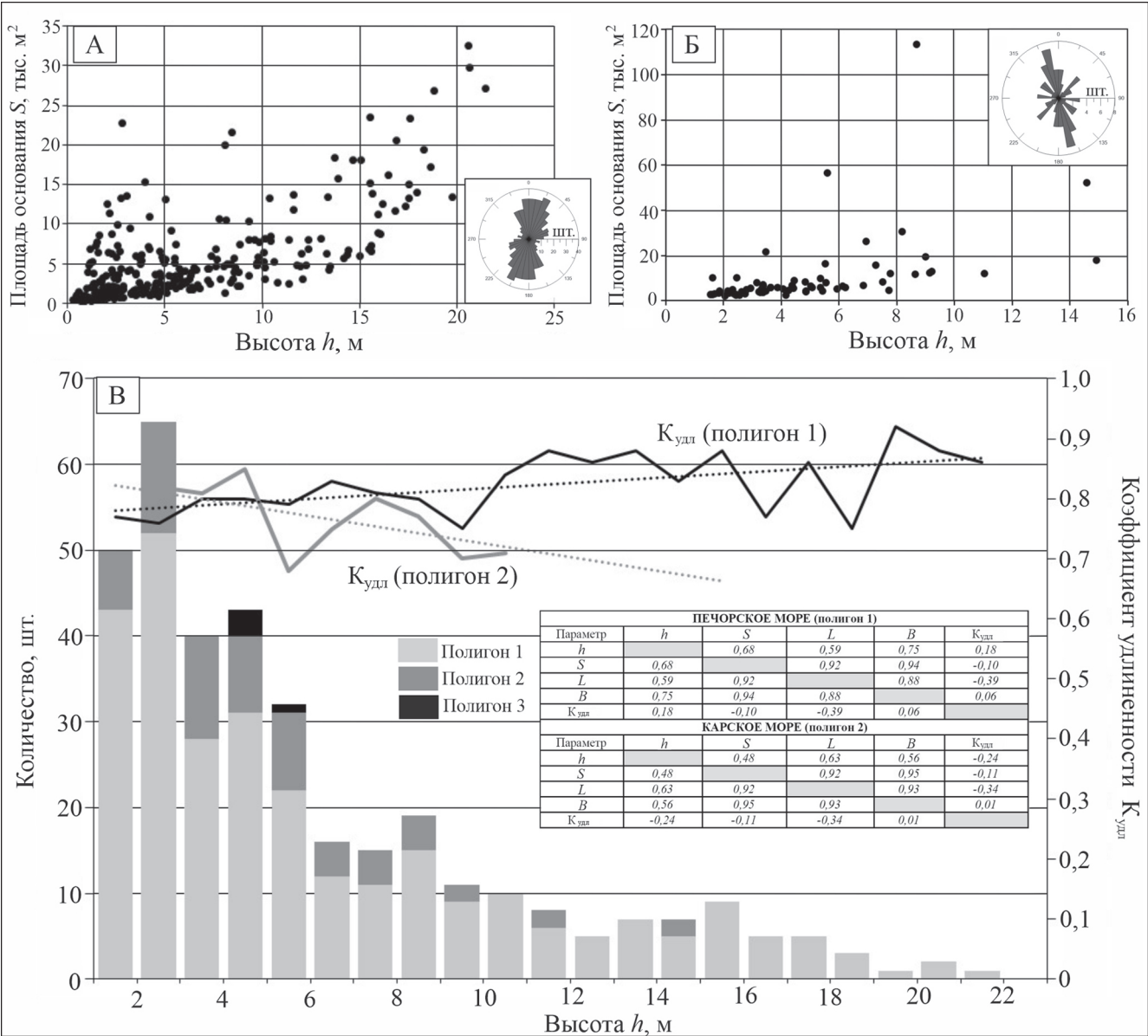


Рис. 4. Результаты анализа морфометрии пингоподобных форм в Печорском и Карском морях:

А – связь между площадью основания и высотой ППФ на полигоне 1 и роза-диаграмма, иллюстрирующая ориентировку удлинённых ППФ; Б – связь между площадью основания и высотой ППФ на полигоне 2 и роза-диаграмма, иллюстрирующая ориентировку удлинённых ППФ; В – количество ППФ разной высоты на трех обследованных полигонах. В таблице приведены коэффициенты корреляции между основными морфометрическими характеристиками: высотой (h), площадью основания (S), длиной (L), шириной (B), коэффициентом удлиненности ($K_{удл} = B/L$)

Fig. 4. Results of the morphometric analysis of pingo-like forms in the Pechora and Kara seas:

А – the relationship between the base area and the height of PLFs at the polygon 1 and a rose diagram illustrating the orientation of elongated PLFs; Б – relationship between the area of the base and the height of PLFs at the polygon 2 and a rose diagram illustrating the orientation of elongated PLFs; В – the number of PLFs of different heights at three surveyed polygons. The table shows correlation coefficients between the main morphometric characteristics: height (h), base area (S), length (L), width (B), and elongation coefficient ($K_{удл} = B/L$)

Подрайон 3в располагается между районами 3а и 3б, глубины в границах полигона изменяются от 55–60 до 70–75 м. Здесь встречаются все типы ППФ, в том числе поднятия грядобразного облика. Плотность ППФ изменяется от 7–10 до 16–25 шт./км². Плотность акустических аномалий в водной толще составляет от 4 до 10 шт./км². Разрез ССК в границах полигона прослеживается наиболее отчетливо. В западной и центральной частях подрайона с поверхности практически повсеместно залегает ССК I. Кровля отложений ССК II залегает на глубинах от первых метров до 8–12 м. Кровля отложений ССК III прослеживается почти повсеместно, залегает на глубинах до 15–25 м и поднимается к поверхности дна, слагая ППФ.

Подрайон 3г располагается в северной части полигона. ППФ первого и второго типов встречаются редко, газопроявления в водной толще распространены относительно равномерно по площади подрайона, плотность их – 1–4 шт./км². Мощность осадков ССК I максимальна на полигоне и достигает 30–35 м. В восточной части подрайона на поверхности дна обнажаются отложения ССК II. Кровля отложений ССК III на территории подрайона прослеживается фрагментарно на глубинах более 50–65 м и поднимается к поверхности дна, слагая ППФ.

Полигон 2 располагается в западной части Карского моря, близ восточной бровки Новоземельского желоба, в пределах контуров нефтегазоносной структуры Университетская-1 на глубинах от 46 до 110 м (см. рис. 1). Многолучевое эхолотирование и высокочастотное сейсмическое профилирование выполнены в рамках 49-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» (2020 г.) и 51-го рейса НИС «Академик Борис Петров» (2022 г.). Вдоль границ полигона располагаются поднятия, оконтуренные изобатами 45–50 м, а в центральной его части – субмеридиональное понижение с отметками глубин в осевой части около 70–110 м (рис. 5А). Судя по морфологии и плановым очертаниям, отрицательные макроформы рельефа полигона представляют собой фрагменты древних (видимо, неогеновых [Ласточкин, 1984]) долин, в значительной степени переработанные водно-ледниковыми процессами в плейстоцене. Наиболее пониженные части днища центральной палеодолины характеризуются выровненным или слабоволнистым рельефом и наличием локальных депрессий с глубинами до 100–110 м. К депрессиям примыкают асимметричные поднятия высотой до 20–25 м. Один борт поднятий, как правило, крутой (до 15–20°) с четко выраженной бровкой, второй – сглаженный (до 5–7°). Какой-либо закономерности в распределении экспозиции крутых и пологих склонов не прослеживается. Нередко поднятия имеют фестончатые в плане бров-

ки, хаотичный расчлененный рельеф, что позволяет предположить участие в формировании их внешнего облика процессов оплывания и оползания. Комплекс этих форм образует общий холмисто-западинный облик днища палеодолины.

По данным ГТК лист S-41-43 [Костин и др., 2004] с поверхности дна в районе работ залегают голоценовые морские илы и ледово-морские позднеплейстоценовые отложения, представленные суглинками, супесями и глинами мощностью до 20–25 м. Ниже вскрываются алевроитистые глины эоцена и олигоцен-миоцена мощностью до 70–100 м, интерпретируемые как дельтовые отложения [Костин, 1998].

На пологих склонах и в меньшей степени в днище палеодолины широко распространены ППФ (выявлено 57 шт.) (см. рис. 5). Это округлые в плане куполовидные постройки в среднем до 100 м в диаметре, высотой до 5–7 м, крутизна склонов – не более 15°. Единичные ППФ имеют гораздо более внушительные размеры и щитовидный поперечный профиль, высота их до 25 м, диаметр – 450–500 м, крутизна склонов при этом невелика – до 8–10°, на вершинной поверхности располагаются воронкообразные понижения глубиной до 3 м и диаметром до 50–80 м. При проведении морфометрического анализа самые крупные ППФ, по-видимому, образованные ранее путем слияния более мелких, не учитывались. Здесь, как и на полигоне 1, преобладают ППФ третьего типа с высотой от 2–3 до 6–7 м (см. рис. 4В). В то же время прямая связь между высотой и площадью основания ППФ существенно слабее (см. рис. 4Б; $r = 0,48$), что может быть связано, в том числе, с большим возрастом форм. В целом немногочисленные удлинённые ППФ ориентированы субмеридионально (азимут 145–185°, см. рис. 4Б), при этом удлинённость ППФ увеличивается по мере роста высоты (см. рис. 4В). Такое изменение морфологии может быть связано с воздействием придонных течений. Причем, в отличие от полигона 1, крупные ППФ здесь сложены с поверхности частично или полностью тальными породами, поэтому слагающий их тонкий осадок, по-видимому, вовлекается в придонный перенос, что приводит к появлению удлинённой формы.

Поверхности пологих поднятий дна осложняют редкие покмарки до 100–150 м в поперечнике, глубиной до 2–3 м. На склонах палеодолины широко развиты участки хаотичного микрорельефа с грядовыми формами, ориентированными как параллельно простиранию склона, так и в крест ему. Относительные перепады высот на таких участках составляют 5–6 м, расстояние между грядами не превышает 15–30 м, крутизна склонов гряд достигает 15–20° и более. Судя по морфологии и геомор-

фологической позиции этих гряд, их генезис может быть связан с процессами оползания и оплывания отложений на склонах палеодолины. Выположенные вершинные поверхности поднятий, окружающих древнюю долину, осложнены бороздами

айсбергового выпаживания шириной 30–150 и глубиной 2–10 м. Борозды, как правило, обрываются на склонах поднятий, однако наиболее протяженная борозда в центральной части полигона прослеживается от бровки до днища (до глубин около 90 м).

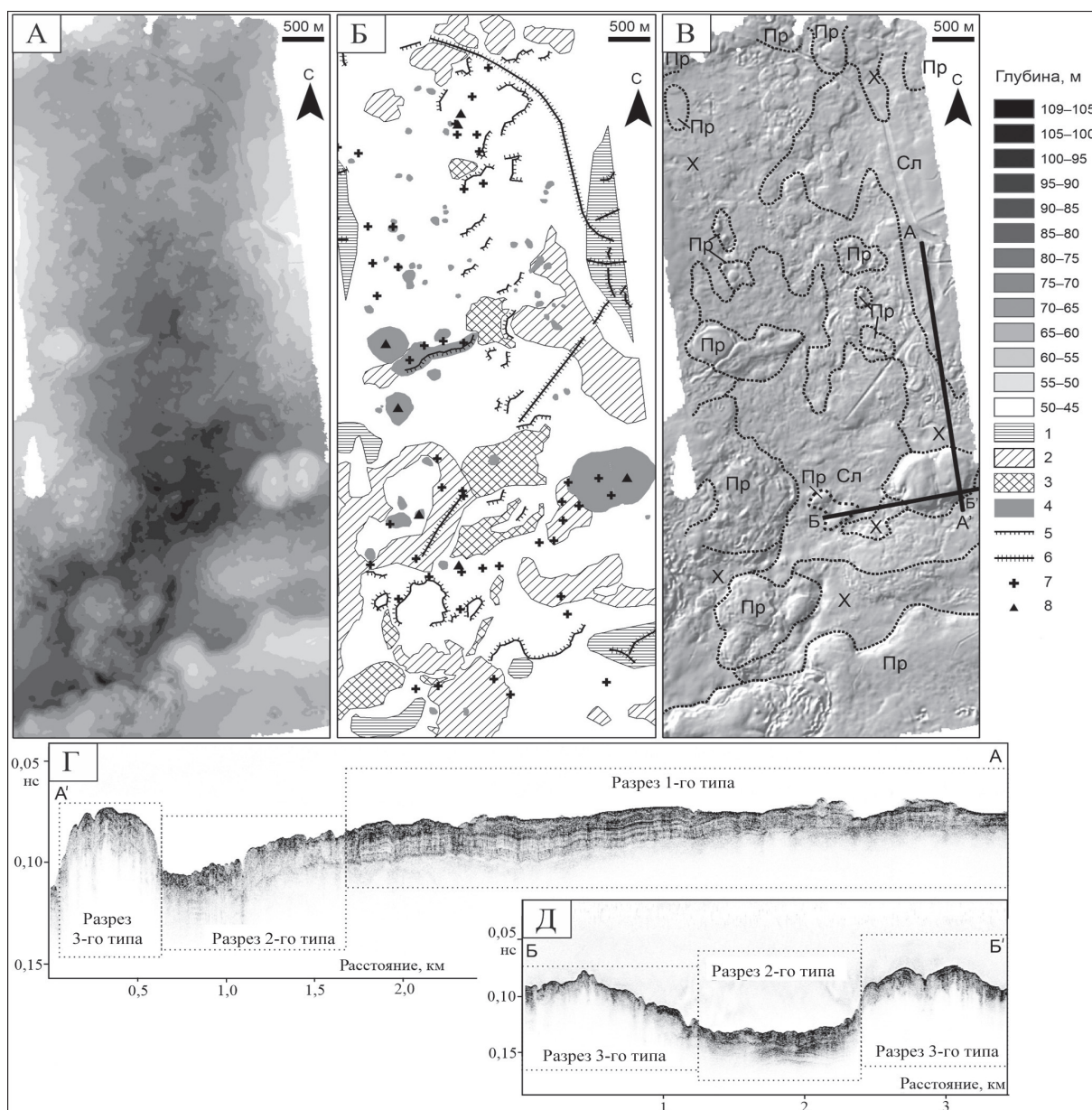


Рис. 5. Морфология рельефа дна и строение ППФ на полигоне 2 (Карское море):

А – цифровая модель рельефа (по данным 49-го рейса НИС «Академик Николай Страхов», 2020 г.); Б – строение мезорельефа дна; В – типы акустического разреза дна (Сл – слоистый (1-й тип); Пр – непроницаемый (3-й тип); Х – хаотический (2-й тип)); Г, Д – профили, полученные методом сейсмоакустического профилирования по линиям А–А' и Б–Б'.

Условные обозначения: 1 – выровненные возвышенности; 2 – всхолмленные участки с хаотичным мезорельефом; 3 – впадины; 4 – пингоподобные формы; 5 – бровки асимметричных поднятий; 6 – экзарационные борозды; 7 – газопровывания в воде; 8 – покмарки

Fig. 5. Morphology of the bottom topography and the structure of PLFs at the polygon 2 (Kara Sea).

A – digital elevation model (according to the data of the 49th cruise of the R/V “Akademik Nikolay Strakhov”, 2020); Б – structure of bottom mesorelief; В – types of bottom acoustic section (Sl – layered (type 1); Pr – impenetrable (type 3); X – chaotic (type 2));

Г, Д – profiles obtained by the method of seismoacoustic profiling along the A–A' and B–B' lines. Legend: 1 – leveled hills;

2 – hilly areas with chaotic mesorelief; 3 – depressions; 4 – pingo-like forms; 5 – edges of asymmetric rises; 6 – exaration furrows; 7 – gas shows in water; 8 – pockmarks

На разрезах, полученных методом высокочастотного сейсмоакустического профилирования, не удается отследить протяженных отражающих горизонтов за исключением подошвы сейсмокомплекса со слоистым акустическим обликом мощностью до 20–22 м (см. рис. 5Г). Этот сейсмокомплекс может быть интерпретирован как толща морских четвертичных отложений, представленных морскими голоценовыми и ледово-морскими позднеплейстоценовыми илами, суглинками, супесями и глинами ($mQ_4 + gmQ_3$). Ниже по разрезу акустический сигнал поглощается, либо прослеживаются отдельные хаотически расположенные отражающие горизонты, ассоциируемые с дельтовыми эоценовыми и олигоцен-миоценовыми глинами. По акустическому облику можно выделить три типа разреза в пределах обследованного полигона (см. рис. 5В, Г, Д):

1) разрез, представленный акустически слоистой пачкой предполагаемых четвертичных отложений с поверхности ($mQ_4 + gmQ_3$) и акустическим фундаментом в виде предполагаемых дочетвертичных отложений;

2) акустически практически непроницаемая толща с поверхности дна;

3) разрез, сочетающий небольшие слоистые пачки, локальные отражающие площадки и полностью акустически прозрачные участки, причем отражения и слоистость фиксируются в пределах отрицательных, а акустически непрозрачные участки – в пределах положительных форм мезорельефа.

Разрез первого типа характерен, в основном, для впадин в осевой части долинообразного понижения и участков крупных поднятий к западу и востоку (палеомеждуречья) (см. рис. 5В). Разрез второго типа характерен для ППФ. Акустическая непроницаемость, отмечаемая локально в данном типе разреза осадочной толщи, может быть вызвана наличием многолетнемерзлых пород (их распространение на площади полигона подтверждено бурением [Миронюк и др., 2019]). Разрез третьего типа характерен для участков с хаотичным мезорельефом на пологих склонах палеодолины и большей части асимметричных поднятий в днище палеодолины. Хаотические отражения и в целом сложный сейсмический облик разреза на этих участках может быть обусловлен сочетанием мерзлых и талых отложений в пределах положительных и отрицательных форм рельефа соответственно.

Газопроявления в водной толще (см. рис. 5Б), в основном, приурочены к участкам с хаотичным рельефом дна, покмаркам и ППФ и чаще всего представляют собой слабо детектируемые участки повышенной акустической мутности. Вертикальные акустические аномалии факельного типа крайне редки и приурочены только к самым крупным ППФ.

Полигон 3 расположен в центральной части Байдарацкой губы Карского моря в 12 км к юго-западу от мыса Понтон – южной оконечности косы Марсальские Кошки (см. рис. 1), глубина изменяется от 19 до 26 м. Восточная часть полигона расположена на глубинах 21–22 м, западная – относительно пониженная (глубины 23–24 м) (рис. 6А).

Рельеф дна в пределах полигона ступенчатый с общим уклоном с северо-востока на юго-запад, представляет собой морскую равнину позднеплейстоценового возраста, сформированную на этапе каргинской трансгрессии [Назаров и др., 2015]. В северной и северо-восточной частях полигона поверхность дна осложнена бороздами ледового выпахивания глубиной около 0,5 м и шириной до 45–50 м. В центральной части полигона выявлено пять слабо удлиненных в плане ППФ высотой порядка до 3–4, шириной 40–45, длиной 50–70 м с симметричными склонами крутизной 8–12°.

По результатам высокочастотного сейсмоакустического профилирования выраженных газопоявлений в водной толще не установлено, однако признаки газонасыщенности осадков читаются на разрезах с тремя сеймостратиграфическими комплексами, ассоциируемыми с ССК, выделенными для центральной части Байдарацкой губы в работе [Рокос, Тарасов, 2007] (см. рис. 6):

1) залегающий с поверхности ССК I с хаотической высокоамплитудной записью мощностью от первых метров до 10–15 м (ассоциируется с морскими голоценовыми илами и песками суглинками (mQ_4)); отложения залегают в локальных понижениях рельефа и впадинах кровли нижележащего горизонта, их мощность и площадь распространения нарастают в южном направлении с увеличением глубин дна;

2) акустически слоистый, газонасыщенный ССК II мощностью от 3 до 7 м (ассоциируется с каргинскими глинами и суглинками (mQ_3)); залегают преимущественно под ССК I, в северной и южной частях полигона нередко обнажаются на поверхности дна;

3) акустически непрозрачный ССК III с расчлененным рельефом кровли (ассоциируется с кровлей мерзлых и/или газонасыщенных зырянских песков (amQ_3)); на поверхности дна отложения ССК III обнажаются только непосредственно на самих ППФ, которые они и слагают.

Особенностью ППФ полигона является их лучшая морфологическая выраженность и нередкое соседство с достаточно глубокими впадинами. В частности, слабо удлиненные в плане поднятия в северной части полигона (1 и 2, см. рис. 6Б) имеют высоту порядка 2–2,5, ширину от 35 до 40, длину – 55–60 м. Их разделяет удлиненная в плане впадина шириной 100–120 и длиной 210–220 м, крутизна ее

склонов достигает $16\text{--}18^\circ$, относительная глубина – около 5,5 м. Впадина заполнена отложениями ССК I мощностью до 15 м (см. рис. 6В, Г). ППФ в юго-восточной части полигона (3 и 4, см. рис. 6Б) имеют близкие морфометрические параметры (высота около 3, ширина около 35, длина около 70 м). Их окружают впадины глубиной до 1 м и диаметром около 200 м, заполненные отложениями ССК I мощностью

до 9–11 м. В толще осадков ССК II нередко фиксируются акустические аномалии, в частности – яркие пятна на участках близкого подъема к поверхности кровли ССК III. Такого рода аномалия выявлена на южном борту крупной впадины в центральной части полигона (показана цифрой 4, см. рис. 6Г). Можно предположить, что в прибровочной части этой впадины начинается формирование новой ППФ.

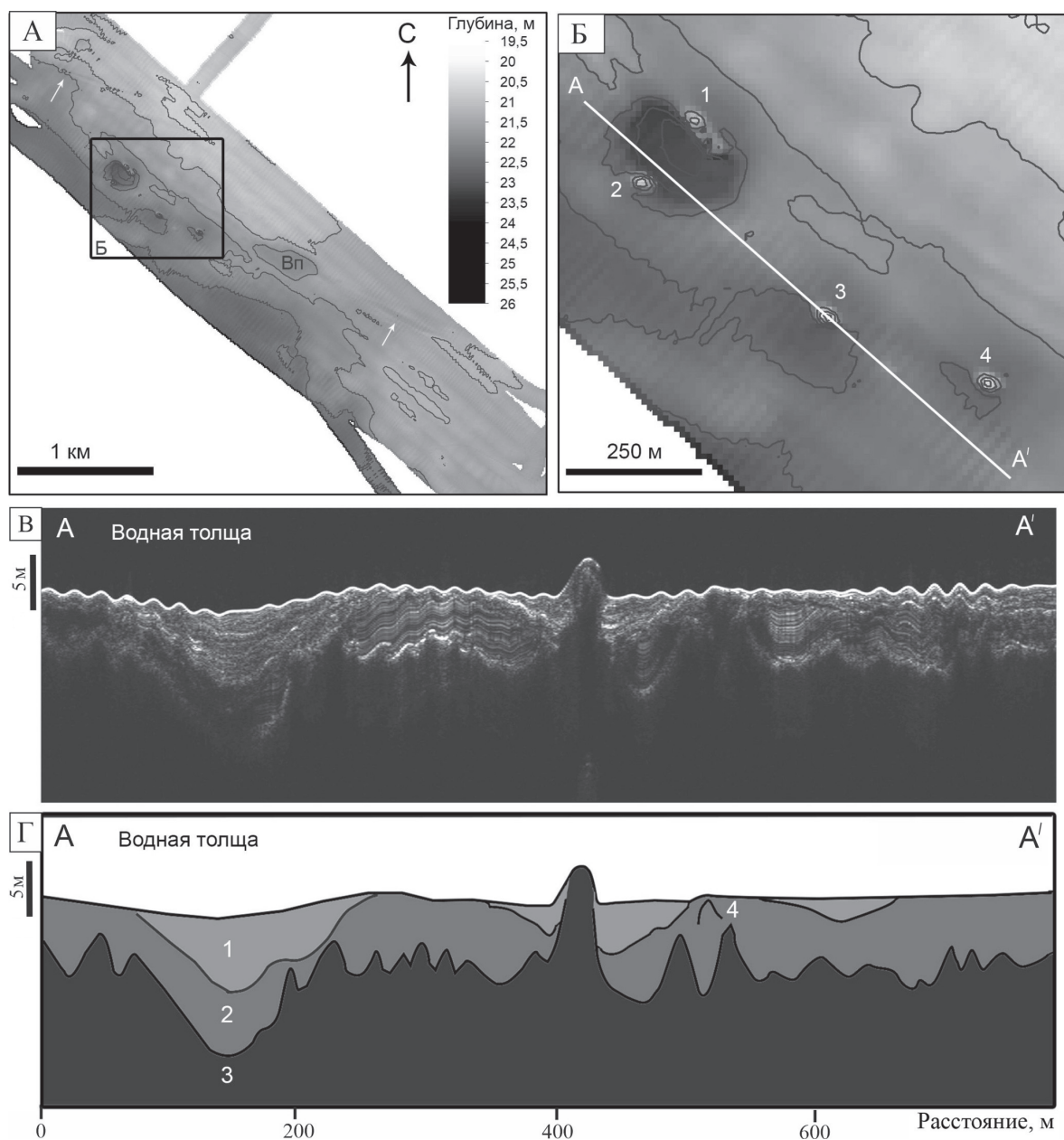


Рис. 6. Морфология рельефа и строение ППФ на полигоне 3 (Байдарацкая губа):

А – цифровая модель рельефа (по данным 52-го рейса НИС «Академик Николай Страхов», изобаты проведены через 0,5 м, стрелками показаны экскавационные борозды); Б – цифровая модель участка полигона 3, осложненного ППФ (А–А' – положение сейсмоакустического разреза); В – разрез, полученный методом высокочастотного акустического профилирования; Г – он же, с интерпретацией (1 – ССК I; 2 – ССК II; 3 – ССК III; 4 – формирующаяся ППФ)

Fig. 6. Relief morphology and the structure of PLFs at the polygon 3 (Baydaratskaya Bay):

А – digital elevation model (according to the data of the 52nd cruise of the R/V “Akademik Nikolai Strakhov”, isobathic lines are drawn every 0,5 m, the arrows show exaration furrows); Б – digital model of an area with PPFs within polygon 3 (А–А' – position of the seismoacoustic section); В – section obtained by the method of high-frequency acoustic profiling; Г – the same, with interpretation (1 – SSC I; 2 – SSC II; 3 – SSC III; 4 – an emerging PLF)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ результатов предшествующих исследований ППФ [Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015; Богданов и др., 2002] и полученных новых данных по юго-западной части Карского шельфа и центральной части шельфа Печорского моря позволяет заключить, что морфология ППФ и их современная динамика определяются комплексом условий и факторов развития шельфовой зоны. В частности, полученные данные подтверждают, что ареалы ППФ на шельфе приурочены к участкам распространения ММП и ассоциированы с районами проявления дегазации как в водной толще, так и в рыхлых

осадках, слагающих дно. Наличие многолетнемерзлых пород на разной глубине (от 10–20 до 40 м) в верхней части осадочного разреза юго-западной части Карского шельфа неоднократно подтверждено бурением (рис. 7, табл.) и сейсмопрофилированием.

Акустические маркеры наличия ММП на юге и юго-востоке Карского шельфа идентифицированы до глубин дна порядка 60–70 м, кровля ее установлена на глубине 5–60 м (в основном – 10–20 м) от поверхности дна [Рекант, Васильев, 2011]. При этом авторы [Рекант, Васильев, 2011] отмечают, что ММП потенциально могут залегать и на глубинах больше 60–70 м.

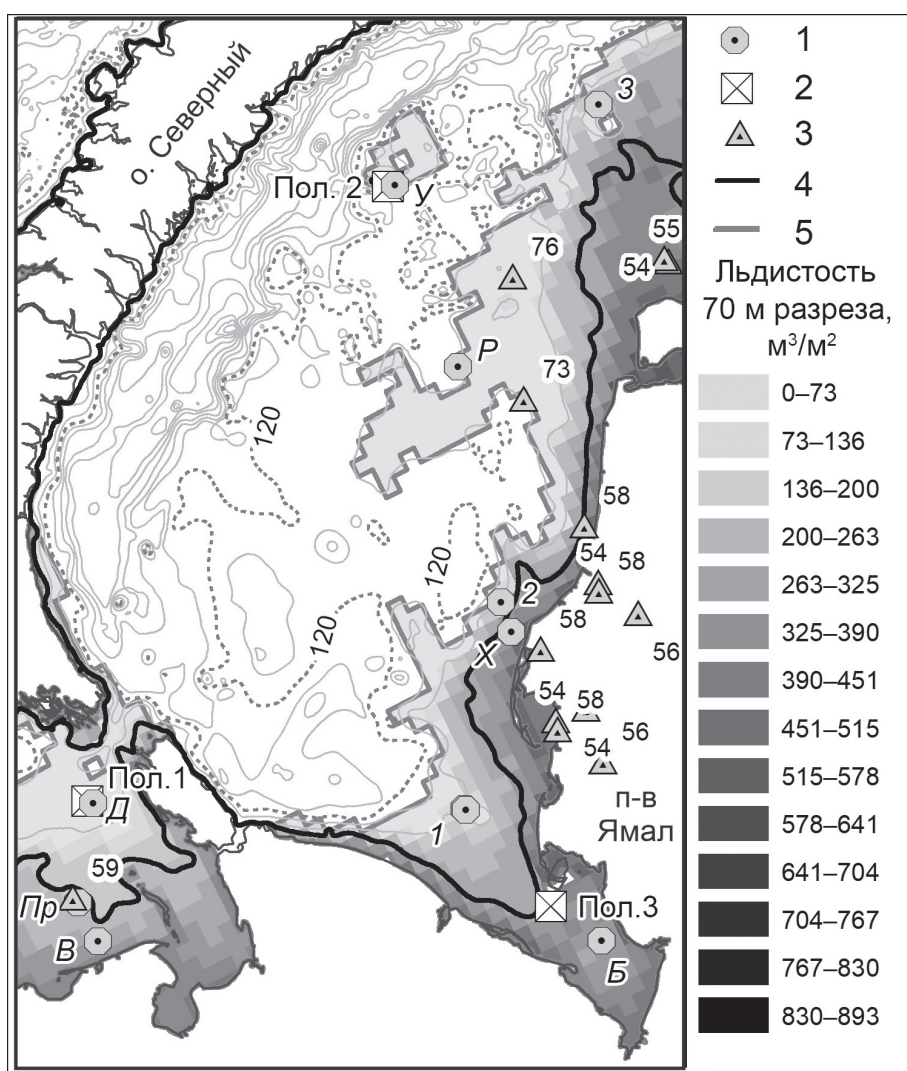


Рис. 7. Изученность и модельная льдистость (по [Overduin et al., 2019]) многолетнемерзлых пород.

Условные обозначения: 1 – скважины, вскрывшие ММП (буквами обозначены обследованные площади, см. табл., по данным [Бондарев и др., 2002; Камалов и др., 2006; Мельников, Спесивцев, 1995; Миронюк и др., 2019; Serov et al., 2015]); 2 – полигоны, рассмотренные в настоящей работе; 3 – точки измерения теплового потока и его величина в мВт/м² (по данным [Хуторской и др., 2003]); 4 – изобата 20 м (по данным модели GEBCO); 5 – граница распространения ММП по данным модели [Overduin et al., 2019].

Расшифровку буквенных обозначений см. табл.

Fig. 7. State of knowledge of the permafrost and simulated ice content (according to [Overduin et al., 2019]).

Legend: 1 – wells that penetrated permafrost (letters indicate surveyed areas, see Table, according to [Bondarev et al., 2002; Kamalov et al., 2006; Melnikov and Spesivtsev, 1995; Mironyuk et al., 2019; Serov et al., 2015]); 2 – polygons considered in the study; 3 – points of heat flow measurements and its values in mW/m² (according to [Khutorskoy et al., 2003]); 4 – 20 m isobath line (according to the GEBCO model); 5 – boundary of the permafrost area according to the model data [Overduin et al., 2019]

**Глубина залегания кровли многолетнемерзлых пород в морях Печорском и Карском
(юго-западная часть) по опубликованным данным**

Район	Источник	Глубина моря, м	Глубина залегания кровли ММП, м от поверхности дна
Осевая часть Байдарацкой губы (Б)	[Камалов и др., 2006]	20–25	10–20
Приразломная площадь (Пр)	[Мельников, Спесивцев, 1995]	21	22,5
Варандейская площадь (В)		15	40
Печорское море, полигон «Диapiры» (Д)	[Бондарев и др., 2002]	58–72	От 0 (на ППФ) до 25–30
Русановская площадь (Р)	[Мельников, Спесивцев, 1995]	114	13,5
		80	10
Университетская площадь (У)	[Миронюк и др., 2019]	75–80	5–10
Горло Байдарацкой губы (1, местоположение пробуренной ППФ)	[Serov et al., 2015]	35	0 (на ППФ)

Выполненные исследования подтверждают наличие признаков дегазации на участках распространения ППФ, отмеченной в более ранних работах [Миронюк и др., 2019; Миронюк, 2020; Paull et al., 2007; Serov et al., 2015]. Ранее указывалось [Portnov et al., 2013], что бо́льшая часть ареалов газопроявлений сосредоточена на участках с глубинами дна более 20 м, на меньших глубинах дегазации препятствует наличие сплошной многолетней мерзлоты. При этом нахождение на глубинах около 45 м метана, связанного, вероятно, с поступлением грунтовых вод с суши вдоль подошвы мерзлоты [Semenov et al., 2020], свидетельствует о возможном распространении сплошной мерзлоты и на бо́льших глубинах.

Результаты математического моделирования условий существования толщи ММП на шельфе [Portnov et al., 2014] показывают следующие характеристики ММП на модельной глубине в 40 м: при величине теплового потока порядка 50 мВт/м² мощность ММП достигает порядка 170–200 м, при 60 мВт/м² мощность ММП сокращается до 70–80 м. При величине теплового потока в 70 мВт/м² сплошная толща мерзлых пород замещается отдельными маломощными (менее 30–40 м) островами ММП. При уменьшении глубины моря мощность толщи ММП и ее сплоченность увеличиваются, а глубина залегания кровли уменьшается [Portnov et al., 2014]. В то же время по данным моделирования других авторов [Gavrilov et al., 2020] мощность ММП на шельфе не превышает 100 м, а при глубине моря более 20 м сплошная мерзлота и крупные островные массивы мерзлых пород отсутствуют полностью. Другие модельные оценки указывают на возможность наличия на шельфе гораздо более мощных (350–500 м) толщ ММП [Overduin et al.,

2019]. При этом модель [Overduin et al., 2019] свидетельствует в пользу более широкого распространения островных ММП, хотя на глубинах более 40–50 м льдистость ММП по результатам моделирования резко снижается (см. рис. 7). В то же время модельные расчеты не учитывают локальные неоднородности характеристик грунтов (например, фактические колебания льдистости) и повышенные значения теплового потока, связанные с разрывными нарушениями и разломными зонами. Поэтому нельзя исключить наличие значительных по мощности и площади массивов ММП в диапазоне глубин от 20–30 до 110–120 м. В некоторых работах указывается на возможность распространения спорадической мерзлоты и на бо́льших глубинах (до 250 м и более, по [Шполянская, 2015]).

Используя результаты моделирования [Gavrilov et al., 2020; Overduin et al., 2019], опубликованные сведения (см. ссылки на источники в табл.) и собственные материалы по ключевым полигонам исследования, можно предположить, что с учетом величин теплового потока порядка 60–75 мВт/м² в рассматриваемой акватории Карского и Печорского морей мощность субаквальных ММП, по-видимому, не превышает 100 м. При этом сплошная мерзлота присутствует на мелководье до глубин около 20–30 м. На бо́льших глубинах ММП распространены в виде отдельных островных массивов и на глубине от 70–80 до 100–110 м их наличие достоверно не установлено.

Таким образом, развитие рельефа дна изучаемых участков шельфа происходит в сложных геокриологических условиях и под влиянием процесса дегазации, природа которого в разных частях шельфовой зоны остается дискуссионной. ППФ, безусловно,

обязаны своим происхождением сложному взаимодействию поднимающихся к поверхности дна флюидов с геокриологически и литологически неоднородной толщей пород, слагающих дно. Результаты исследований позволяют заключить, что плотность и морфология ППФ в разных частях шельфа во многом связаны с историей развития шельфа в последние 10–15 тыс. лет, которая, в свою очередь, предопределила различия в мощности и характере мерзлоты, а также интенсивности проявления дегазации в настоящее время.

Полигон 3 (Байдарацкая губа) расположен в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород на шельфе. Трансгрессия началась здесь около 7–8 тыс. лет назад [Gavrilov et al., 2020] и, по-видимому, происходила с достаточно высокой скоростью. При этом фаза пребывания затопляемой суши в зоне волнового воздействия и погружения до глубин максимального прогрева воды порядка 5–10 м длилась сравнительно недолго. ММП оттаивали на небольшую глубину, ниже которой температура пород оставалась отрицательной [Камалов и др., 2006]. Несмотря на относительно низкую интенсивность ледового выпавивания в диапазоне глубин более 15–20 м [Огородов, 2014], полигон 3 на протяжении как минимум последних 5–6 тыс. лет [Gavrilov et al., 2020] должен был подвергаться экзарационному воздействию. В то же время выявлено отсутствие в микрорельефе вершинных поверхностей и склонов ППФ каких-либо признаков ледового воздействия. Таким образом, можно заключить, что ППФ на дне Байдарацкой губы – это относительно молодые флюидогенные формы, образованные путем выдавливания пластично-мерзлых (а местами и частично оттаявших) пород под действием потока флюидов. Отсутствие проявлений дегазации в водной толще и выраженных вертикальных аномалий в разрезе талых пород указывает, в целом, на слабую интенсивность дегазации у поверхности дна. Вероятно, это связано с наличием сплошной мерзлоты, играющей роль флюидоупора.

На полигоне 2 (Карское море) с глубинами 100–110 м обстановка наиболее древнего наступления морских условий на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена. Деградация ММП началась здесь на ранних этапах трансгрессии около 12–15 тыс. лет назад [Gavrilov et al., 2020], по-видимому, тогда же началось и формирование отдельных ППФ. Развитие ППФ происходило в условиях достаточно активной деятельности придонных течений, что привело к проявлению асимметрии в их морфологии. Процессы деградации мерзлоты сопровождались как площадным вытаяванием, так и оплыванием, а также солифлюкцией на склонах палеодолины, что привело к формированию холмисто-западинной

поверхности ее днища и грядово-увалистого рельефа на склонах. По-видимому, именно с частичным оттаиванием пород, слагающих ППФ, и их смещением по склонам этих форм связана слабость установленной в ходе морфометрического анализа связи между высотой ППФ и площадью их основания. Можно заключить, что новообразование ППФ на данном полигоне путем выпучивания пластичных грунтов давлением газа на подошву мерзлоты в настоящее время уже практически или вовсе не происходит (ММП, скорее всего, деградировали, так как на акустических разрезах уверенно их выделить нельзя). Образованные ранее ППФ в настоящее время развиваются под действием склоновых процессов (отмечены следы массового оползания на их склонах), а также процесса дегазации по вертикальным каналам, хорошо заметным на профиле (см. рис. 5Г, Д). Можно предположить некоторое участие в современной динамике крупных ППФ и псевдовулканизма, на возможность этого указывалось в работе [Миرونюк и др., 2019].

Территория полигона 1 (Печорское море) была затоплена в ходе трансгрессии около 10–12 тыс. лет назад [Gavrilov et al., 2020]. К этому времени здесь сформировалась мощная толща аллювиально-морских и озерных отложений, в значительной степени мерзлая. По-видимому, сочетание большой мощности четвертичных отложений (в том числе, многолетнемерзлых), высокой активности дегазации и наличия системы разломов (возможно, активных и на современном этапе [Крапивнер, 2007]) привели к формированию большого количества ППФ разных морфологических типов. Участки максимальной плотности газопроявлений и ППФ хорошо коррелируют с разломами и контурами нефтегазоносной структуры Рейнекской, установленной на полигоне по данным [Вискунова и др., 2003] (см. рис. 3Л, М). Наличие кратероидных понижений на вершинах и оплывно-оползневых форм на склонах ППФ, валобразных поднятий, вкупе с практически повсеместным развитием газопроявлений на крупных ППФ свидетельствуют об очень высокой современной активности процессов пучения. Таким образом, в центральной части Печорского моря формирование ППФ произошло достаточно давно, и процесс пучения под действием потока флюидов продолжается и в настоящее время. В ориентировке грядобразных поднятий, образованных за счет слияния близко расположенных ППФ на полигоне 2, прослеживается ортогональность (см. рис. 2В), которая может быть объяснена выдавливанием пластичных грунтов по межблоковым понижениям деградирующих ММП с полигонально-жильной структурой.

Полученные результаты демонстрируют зависимость морфологии и современной динамики

флюидогенного рельефа шельфа от геолого-тектонической позиции, наличия и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления конкретного участка шельфа в ходе голоценовой трансгрессии. При этом первоначальные условия формирования многолетнемерзлой толщи в разрезе ППФ могли быть как субмаринными (дрессельный эффект [Мельников и др., 1998], замерзание пресных подмерзлотных грунтовых вод при контакте с холодными придонными водами [Paull et al., 2022; Serov et al., 2015]), так и субаэральными [Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007]. Каков бы ни был механизм формирования ММП, происхождение ППФ на шельфе можно уверенно связать с пучением и выдавливанием пород под действием потока флюидов из недр. Примечательно, что вне районов распространения ММП подобные формы пока не обнаружены.

ВЫВОДЫ

На основании приведенных результатов исследования можно сформулировать следующие основные выводы, дополняющие существующие представления [Бондарев и др., 2002; Миرونюк и др., 2019; Paull et al., 2022; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015] о характере распространения и динамики ППФ на шельфах западноарктических морей.

1. ППФ были сформированы в субаквальных условиях после затопления шельфа в ходе голоценовой трансгрессии в результате выпучивания и выдавливания пластичных льдистых пород под действием потока флюидов из недр. Плотность и морфологическое разнообразие ППФ зависят от геолого-тектонической позиции участка дна, наличия

и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления шельфа в ходе голоценовой трансгрессии.

2. На участках с глубинами более 70–80 м эти формы сформировались на ранних стадиях голоценовой трансгрессии, и к настоящему моменту многолетнемерзлые породы там уже в значительной степени, а местами и полностью оттаяли. Однако ППФ сохраняют свою выраженность в рельефе и активно преобразуются деятельностью придонных течений, склоновыми и, возможно, псевдовулканическими процессами, связанными с продолжающейся дегазацией.

3. На мелководных (до 20–30 м), близких к берегу участках шельфа ППФ достаточно малочисленны и, по-видимому, продолжают формироваться в настоящее время. При этом большая мощность и сплошность ММП препятствуют активному флюидопотоку, и газопроявления в воде и рыхлой части разреза относительно малочисленны. Для ППФ таких участков характерна морфология конусообразных бугров, отсутствие признаков интенсивного выхода газов.

4. На промежуточных глубинах (от 20–30 до 70–80 м) при наличии островной или прерывистой многолетней мерзлоты в условиях высокой интенсивности потока флюидов в районе разломных зон и нефтегазоперспективных структур морфологическое разнообразие и плотность ППФ достигают максимальных значений. На таких участках в приповерхностной толще осадков сочетаются продолжающиеся местами процессы пучения и активная дегазация, что предопределяет широкое разнообразие морфологических типов ППФ.

Благодарности. Морские экспедиционные работы выполнены в рамках темы госзадания ГИН РАН № FMUN-2019-0076 «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами» (2018–2021), а также по теме госзадания ИО РАН FMWE-2021-0005. Экспедиционные исследования в 2022 г. и их камеральная обработка выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бирюков В.Ю., Ермолов А.А., Огородов С.А. Рельеф дна Байдарацкой губы Карского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2008. № 3. С. 80–84.
- Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.
- Вискунова К.Г., Каленич А.П., Маркина Н.В., Шкарубо С.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (второе поколение). Западно-Сибирская серия. Лист R-38-40. Карта полезных ископаемых и прогноза нефтегазности. СПб.: ВСЕГЕИ, 2003.
- Камалов А.М., Огородов С.А., Бирюков В.Ю., Совершова Г.Д., Цветинский А.С., Архитов В.В., Белова Н.Г., Носков А.И., Соломатин В.И. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 3. С. 3–14.
- Костин Д.А., Кузин И.Л., Лопатин Б.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (второе поколение). Лист S-41-43. Карта плиоцен-четвертичных образований. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004.
- Костин Д.А. Миоценовая дельта Южно-Карского шельфа // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геол. 1998. Т. 73. Вып. 5. С. 65–68.

- Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
- Ласточкин А.Н. Морфология и генезис подводных долин северного шельфа Евразии // Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. М.: Наука, 1984. С. 22–28.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 194 с.
- 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.
- Миронюк С.Г., Колубакин А.А., Голенок О.А., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение // Геология морей и океанов: материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2019. Т. 5. С. 192–196.
- Миронюк С.Г. Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование: материалы Всероссийской конференции с международным участием. 2020. С. 37–43.
- Назаров Д.В., Костин Д.А., Шишкин М.А., Файбусов Я.Э. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Западно-Сибирская серия. Лист R-42. Карта плиоцен-четвертичных образований. СПб.: ВСЕГЕИ, 2015.
- Огородов С.А. Рельефообразующая деятельность морских льдов: дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2014. 261 с.
- Рекант П.В., Васильев А.А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 4. С. 69–72.
- Рокос С.И., Тарасов Г.А. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. № 67. 2007. С. 66–75.
- Тулапин А.В., Рокос С.И., Длугач А.Г. Скоростное моделирование и динамический анализ сейсмоакустических изображений диапироподобных структур в Печорском море // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. СПб., 2021. Вып. 8. С. 246–251.
- Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-Арктического бассейна // Геотектоника. 2003. № 3. С. 79–96.
- Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики «глазами» подземных льдов. М.: Ижевск: Ин-т комп. иссл., 2015. 344 с.
- Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints, *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, p. 1857–1873, DOI: 10.5194/tc-14-1857-2020.
- Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow: the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*, Cambridge University Press, 2007, 492 p.
- 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, iss. 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, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40(15), p. 3962–3967, DOI: 10.1002/grl.50735.
- Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf, *Journal Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, p. 2082–2094, DOI: 10.1002/2014JG002685.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A., Egorov A., Vanshtein B. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *Journal Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingos in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174(4011), p. 816–818, DOI: 10.1126/science.174.4011.816.

Электронные ресурсы

GEBCO 2014 Grid – version 20141103. URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/version_20141103 (дата обращения 01.09.2022).

Поступила в редакцию 28.09.2022

После доработки 16.11.2022

Принята к публикации 01.12.2022

FLUIDOGENIC LANDFORMS WITHIN THE PERMAFROST ZONE ON THE SHELF OF THE PECHORA AND KARA SEAS

A.V. Kokhan¹, E.A. Moroz², E.A. Eremanko³, A.P. Denisova⁴, R.A. Ananiev⁵, E.A. Sukhikh⁶,
S.L. Nikiforov⁷, S.Yu. Sokolov⁸, A.A. Razumovskiy⁹

^{1-4, 8} Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Laboratory of geology and tectonics of sea bottom

^{3, 4} Lomonosov Moscow State University, geographical faculty, department of geomorphology and palaeogeography

^{5, 7} Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, laboratory of seismic stratigraphy

⁶ Geological Institute of Russian Academy of Sciences, laboratory of heat and mass transfer

⁹ Geological Institute of Russian Academy of Sciences, laboratory of folded belts

¹ Junior Researcher; e-mail: kkkkk1987@mail.ru

² Senior Researcher; e-mail: morozzea@gmail.com

³ Docent; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

⁴ Laboratory Assistant, student; e-mail: anden6900@gmail.com

⁵ Researcher; e-mail: corer@mail.ru

⁶ Researcher; e-mail: sukhikh_ea@mail.ru

⁷ Chief Researcher; e-mail: nikiforov@ocean.ru

⁸ Chief Researcher; e-mail: sysokolov@yandex.ru

⁹ Researcher; e-mail: anatoly.razumovskiy@mail.ru

The study is based on the results of multibeam echo-sounding and high-frequency seismic profiling during the 2018–2022 cruises of the R/V “Akademik Nikolai Strakhov” and “Akademik Boris Petrov”. Regular changes of morphometric parameters and the internal structure of pingo-like formations of the shelves of the Pechora and Kara seas were revealed. A morphometric analysis of pingo-like formations was carried out, which made it possible to draw conclusions about their relative age, as well as the role of near-bottom currents and slope processes in their modern dynamics. It was found that the density and morphological variety of pingo-like formations depend on the geological and tectonic features of the bottom area, the presence and nature of permafrost, the intensity of degassing, and the time of shelf flooding during the Holocene transgression. Pingo-like formations on the shelf, where the depth exceeds 70–80 m, emerged at the early stages of the Holocene transgression, and by now the permafrost there has largely thawed out. At the same time, pingo-like formations are still prominent in the relief and actively transformed by bottom currents, slope and, possibly, pseudovolcanic processes associated with ongoing degassing. Pingo-like formations are rare within shallow (up to 20–30 m) shelf areas close to the shore, and, apparently, continue their evolution at present. At the same time, the large thickness and continuity of permafrost prevent active fluid flow, acting as a seal. Pingo-like formations in the shallow-water zones are mainly cone-shaped mounds without intensive degassing. The density of pingo-like formations is maximum at the intermediate depths (from 20–30 to 70–80 m), in the presence of insular or discontinuous permafrost, under high fluid flow intensity within the fault zones and oil- and gas-bearing structures. Near-surface sediments in such areas are characterized by a combination of localized processes of heaving and active degassing. It predetermines a wide variety of the morphological types of pingo-like formations. Keywords: Arctic, bottom topography, degassing, pingo-like features, acoustic anomalies, multibeam echo sounding, seismoacoustic profiling

Keywords: Arctic, bottom topography, degassing, pingo-like formations, acoustic anomalies, multibeam echo-sounder survey, continuous seismoacoustic profiling

Acknowledgements. Marine expedition was carried out under the state task of the GIN RAS no. FMUN-2019-0076 “Geological hazards in the World Ocean and their addiction to relief, geodynamic and tectonic processes” (2018–2021), as well as under the state task of the IO RAS FMWE-2021-0005. Expedition of 2022 and cameral processing of results were financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-77-10091 “Spatial Patterns of Degassing Manifestation on the Barents-Kara Shelf and Its Influence on Relief and Bottom Sediments”).

REFERENCES

- Biryukov V.Ju., Ermolov A.A., Ogorodov S.A. Rel'ef dna Bajdarackoj guby Karskogo morja [Bottom relief of the Baidaratskaya Bay, inlet Kara Sea], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2008, no. 3, p. 80–84. (In Russian)
- Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A., Dlugach A.G., Poljakova N.A. Podmerzlotnye skoplenija gaza v verhnjej chasti osadochnogo chehla Pechorskogo morja [Underpermafrost accumulations of gas in the upper part of sedimentary cover of the Pechora Sea], *Geologiya i geofizika*, 2002, vol. 43, no. 7, p. 587–598. (In Russian)
- Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints, *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, p. 1857–1873, DOI: 10.5194/tc-14-1857-2020.
- Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow: the Impact on Geology, Biology and the Marine Environment*, Cambridge University Press, 2007, 492 p.

- Khutorskoi M.D., Podgornyykh L.V., Gramberg I.S., Leonov Yu.G. Termotomografiya Zapadno-Arkticheskogo bassejna [Thermal tomography of the West Arctic Basin], *Geotektonika*, 2003, no. 3, p. 79–96. (In Russian)
- Kamalov A.M., Ogorodov S.A., Birukov V.Ju., Sovershaeva G.D., Tsvetsinsky A.S., Arkhipov V.V., Belova N.G., Noskov A.I., Solomatin V.I. Morfolitodinamika beregov i dna Bajdarackoj guby na trasse perehoda magistral'nymi gazoprovodami [Coastal and seabed morpholithodynamics of the Baydaratskaya Bay at the route of gas pipeline crossing], *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 3, p. 3–14. (In Russian)
- Kostin D.A., Kuzin I.L., Lopatin B.G. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1 : 1 000 000 (vtoroe pokolenie), list S-41-43, karta pliocen-chetvertichnyh obrazovanij* [State geological map of the Russian Federation, Scale 1 : 1 000 000 (second generation), Sheet S-41-43, Map of the Pliocene-Quaternary formations], St.-Petersburg, VSEGEI Publ., 2004. (In Russian)
- Kostin D.A. Miocenovaja del'ta Juzhno-Karskogo shel'fa [Miocene Delta of the South Kara Shelf], *Bjulleten' Moskovskogo obshhestva ispytatelej prirody, Otd. geol.*, 1998, vol. 73, iss. 5, p. 65–68. (In Russian)
- Krapivner R.B. Priznaki neotektonicheskij aktivnosti Barencevomorskogo shel'fa [Indications of neotectonic activity at the Barents Sea shelf], *Geotektonika*, 2007, vol. 41, no. 2, p. 73–89. (In Russian)
- Lastochkin A.N. [Morphology and genesis of submarine valleys of the northern shelf of Eurasia], *Vozrast i genezis pereuglublenij na shel'fah i istorija rechnyh dolin* [Age and genesis of the overdeepenings on shelves and the history of river valleys], Moscow, Nauka Publ., 1984, p. 22–28. (In Russian)
- Mel'nikov V.P., Fedorov K.M., Vol'f A.A., Spesivcev V.I. Analiz vozmozhnogo scenarija obrazovanija pridonnyh ledjanyh bugrov na shel'fe Pechorskogo morja [Analysis of possible scenario of ice column formation on the Pechora Sea shelf], *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. 11, no. 4, p. 51–57. (In Russian)
- Mel'nikov V.P., Spesivcev V.I. *Inzhenerno-geologicheskie i geokriologicheskie uslovija shel'fa Barentseva i Karskogo morej* [Engineering-geological and geocryological features of the Barents and Kara seas shelf], Novosibirsk, Nauka Publ., 1995, 194 p. (In Russian)
- Mironyuk S.G. Fljuidogennye obrazovanija: obosnovanie vydelenija novoj geneticheskij gruppy rel'efa morskogo dna [Fluidogenic Formations: Substantiation of the Identification of a New Genetic Group of Seabed Relief], *VIII Shhukinskie chtenija: rel'ef i prirodopol'zovanie* [VIII Shukin Conference: relief and nature management], Materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 2020, p. 37–43. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A., Roslyakov A.G., Terekhina Ja.E., Tokarev M.Ju. [The mud volcanic structures (vulcanoides) of the Kara Sea: morphological features and structure], *Geologiya morej i okeanov* [Geology of seas and oceans], Proceedings of XXIII International Conference on Marine Geology, Moscow, IO RAN, 2019, vol. 5, p. 192–196. (In Russian)
- Nazarov D.V., Kostin D.A., Shishkin M.A., Fajbusov Ja.Je. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie), Zapadno-Sibirskaja serija, list R-42, karta pliocen-chetvertichnyh obrazovanij* [State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 1 000 000 (third generation), West Siberian series, Sheet R-42, Map of the Pliocene-Quaternary formations], St.-Petersburg, VSEGEI Publ., 2015. (In Russian)
- Ogorodov S.A. *Rel'efoobrazujushhaja dejatel'nost' morskij l'dov* [Relief-forming activity of sea ice], diss. ... D. Sc. in Geography, Moscow, 2014, 261 p. (In Russian)
- 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, iss. 6, p. 3490–3507, DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- 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, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Portnov A., Mienert J., Serov P. Modeling the evolution of climate-sensitive Arctic subsea permafrost in regions of extensive gas expulsion at the West Yamal shelf, *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2014, vol. 119, p. 2082–2094, DOI:10.1002/2014JG002685.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40(15), p. 3962–3967, DOI:10.1002/grl.50735.
- Rekant P.V., Vasil'ev A.A. Rasprostranenie subakval'nyh mnogoletnemerzlyh porod na shel'fe Karskogo morja [Distribution of subaqueous permafrost on the shelf of the Kara Sea], *Kriosfera Zemli*, 2011, vol. XV, no. 4, p. 69–72. (In Russian)
- Rokos S.I., Tarasov G.A. Gazonasyschennye osadki gub i zalivov juzhnoj chasti Karskogo morja [Gas-saturated sediments of bays and gulfs of the southern part of the Kara Sea], *Bjulleten' komissii po izucheniju chetvertichnogo perioda*, 2007, no. 67, p. 66–75. (In Russian)
- Shpolyanskaya N.A. *Plejstocen-golocenovaya istoriya razvitiya kriolitozony Rossijskoj Arktiki "glazami" podzemnyh l'dov* [Pleistocene-Holocene history of the development of the permafrost zone of the Russian Arctic through the "eyes" of permafrost], Moscow, Izhevsk, Int komp. issl. Publ., 2015, 344 p. (In Russian)
- Semenov P., Portnov A., Krylov A., Egorov A., Vanshtein B. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingos in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174(4011), p. 816–818, DOI: 10.1126/science.174.4011.816.
- Tulapin A.V., Rokos S.I., Dlugach A.G. [Seismic velocity modeling and dynamic analysis of the seismoacoustic

- images of PLF in the Pechora Sea], *Relief and chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia], Proceedings of the annual conference on the results of expedition research, iss. 8, St. Petersburg, 2021, p. 246–251. (In Russian)
- Viskunova K.G., Kalenich A.P., Markina N.V., Shkarubo S.I. *Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii masshtaba 1 : 1 000 000 (vtoroe pokolenie), Zapadno-Sibirskaja serija, list R-38-40, karta poleznyh iskopaemyh i prognoza neftegazonosnosti* [State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 1 000 000 (second generation), West Siberian series, sheet R-38-40, Map of minerals and oil and gas potential forecast], St.-Petersburg, VSEGEI Publ., 2003. (In Russian)
- Web source
GEBCO_2014 Grid – version 20141103, URL: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/version_20141103 (access date 01.09.2022).

Received 28.09.2022

Revised 16.11.2022

Accepted 01.12.2022