

## ПРОЯВЛЕНИЯ ДЕГАЗАЦИИ В ПАЛЕОДОЛИНАХ КАРСКОГО ШЕЛЬФА

Е.А. Мороз<sup>1</sup>, Е.А. Еременко<sup>2</sup>, А.П. Денисова<sup>3</sup>, Д.С. Куликова<sup>4</sup>, А.В. Кохан<sup>5</sup>, Р.А. Ананьев<sup>6</sup>,  
С.В. Мазнев<sup>7</sup>, А.Д. Мutowкин<sup>8</sup>

<sup>1–5</sup> Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов,

<sup>2</sup> Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии

<sup>6,8</sup> Институт океанологии РАН, лаборатория сейсмостратиграфии

<sup>7</sup> Институт географии и водной безопасности Республики Казахстан

<sup>1</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр.-минерал. наук; e-mail: morozzea@gmail.com

<sup>2</sup> Доц., канд. геогр. наук; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

<sup>3</sup> Мл. науч. сотр.; e-mail: anden6900@gmail.com

<sup>4</sup> Мл. науч. сотр.; e-mail: daryakulikova@list.ru

<sup>5</sup> Мл. науч. сотр., канд. геогр.-минерал. наук; e-mail: kkkkk1987@mail.ru

<sup>6</sup> Науч. сотр.; e-mail: corer@mail.ru

<sup>7</sup> Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: svmaznev@gmail.com

<sup>8</sup> Вед. инж.; e-mail: admutowkin@mail.ru

В ходе экспедиционных исследований во время 52-го и 56-го рейсов НИС «Академик Николай Стрaхов» в 2021–2023 гг. обследована часть акватории Карского моря к северо-западу от о-ва Белый. По сейсмоакустическим данным были выявлены признаки дегазации в рельефе, осадочном чехле и водной толще на нескольких полигонах, охватывающих фрагменты реликтовых флювиальных форм – палеодолин. Изучены три полигона с разным мезорельефом и строением верхней части разреза рыхлых отложений, охватывающие фрагменты палеодолин на глубинах от 40 до 250 м. Установлено, что в палеодолинах юго-западной части Карского шельфа существуют особые обстановки дегазации, что предопределено рельефом и геокриологическим строением дна. Вертикальная миграция флюидов из глубинных горизонтов приводит к их скоплению у поверхности дна, где в зависимости от сочетания геоморфологических и геокриологических условий происходит их неравномерная разгрузка. Толщи многолетнемерзлых пород (ММП), являющиеся мощным флюидоупором, развиты в долинах фрагментарно. На участках их выклинивания концентрация газопроявлений возрастает. По сейсмоакустическим и батиметрическим данным были выделены покмарки, пингоподобные формы, куполовидные поднятия, грязевулканические образования являющиеся результатом флюидогенной разгрузки. Спектр развитых в палеодолинах флюидогенных форм определяется морфологией рельефа и глубиной: покмарки и грязевулканические постройки более характерны для днищ долин, где мерзлые породы распространены фрагментарно или вовсе отсутствуют; пингоподобные формы (ППФ) встречаются на склонах долин, где снижается мощность и сплоченность ММП, грязевые диапиры-куполовидные поднятия развиты на площадях с практически полным отсутствием ММП. Вне долин газопроявления и флюидогенные формы единичны, что связано с наличием флюидоупора в виде толщи ММП. Результаты исследования позволили установить, что палеодолины являются основными зонами разгрузки флюидов на шельфе Карского моря, а деградация ММП, в том числе под влиянием миграции флюидов, определяет современный микрорельеф и динамику процессов. Полученные данные согласуются с исследованиями в других арктических регионах (шельф моря Бофорта, дельта р. Маккензи), подтверждая универсальность механизмов взаимодействия многолетней мерзлоты и потока флюидов в шельфовой зоне Арктики.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, сейсмоакустика, пингоподобные формы, покмарки

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.6

### ВВЕДЕНИЕ

Рельеф изучаемого района представляет собой субгоризонтальную аллювиально-морскую равнину [Зархидзе, Красножен, 2022], в пределах которой распространены реликтовые флювиальные формы – палеодолины разного ранга [Ласточкин, 1984], формировавшиеся в континентальные эпохи развития шельфа Карского моря в интервале от плиоцена до начала голоценовой трансгрессии [Мусатов,

1998]. Аналогично территориям Баренцевоморского шельфа, где палеодолины также распространены [Ласточкин, 1977], шельф Карского моря характеризуется более широким распространением многолетнемерзлых пород различной мощности [Рокос и др., 2009] с закономерным увеличением ее в мелководных прибрежных частях акватории (рис. 1). Наличие флюидоупора в верхней части осадочного разреза влияет на развитие процесса дегазации,

а глубина кровли мерзлых толщ и ее состояние – на проницаемость разреза и возможность поступления флюидов к поверхности дна.

Ранее выполненные исследования закономерностей развития дегазации и флюидогенного рельефа на Карском шельфе [Serov et al., 2015; Portnov et al., 2013; Миронюк и др., 2019; Кохан и др., 2023; Еременко и др., 2024] выявили, что одной из особенностей площадного развития покмарок и пингоподобных форм (ППФ) является их приуроченность к понижениям рельефа, что обуславливает актуальность детального изучения палеодолин как особых обстановок проявления дегазации. Для палеодолин, в сравнении с прилегающими участками шельфа, характерно сочетание сравнительно большей расчлененности рельефа дна и сложного характера распространения многолетнемерзлых пород. Эти факторы предопределяют специфику проявлений дегазации как в осадочном чехле, так и в рельефе шельфа на участках распространения реликтовых флювиальных форм.

Целью исследования являлась характеристика проявлений дегазации в верхней части осадочного чехла и рельефе в палеодолинах юго-западной части шельфа Карского моря.

В тектоническом отношении исследуемая территория шельфа Карского моря располагается на периферии Южно-Карской впадины, представляющей собой подводное продолжение Западно-Сибирской плиты с аналогичным строением основных структурных ярусов [Богданов, 2004; Конторович, 2018]. Выделяемые на опорных сейсмических профилях [Ступакова, 2011; Вержбицкий и др., 2012; Конторович и др., 2018] крупные разломы в западной части Карского моря прослеживаются в триасовых и юрских осадочных комплексах и реже обнаруживаются в подошве меловых горизонтов. Рисунок разломной сети акватории Карского шельфа по данным работ Морской арктической геолого-разведочной экспедиции (МАГЭ) [Шельфовые..., 2020] позволяет определить наиболее распространенные тренды в ориентировке разломов – с севера на юг и с северо-запада на юго-восток, при наличии субширотных региональных сдвиговых смещений. Тектонический облик рассматриваемого района, сформированный к началу неоген-четвертичного времени, по всей видимости, определил положение наиболее крупных речных систем на шельфе, таких как Палео-Обь, Палео-Енисей в Карском регионе и Палео-Печора в Баренцевоморском регионе [Ласточкин, 1977; Мусатов, 1998]. Возможно, тектонически предопределенной является и локализация палеодолин меньшего порядка с характерными чертами грабенов [Верба, 2007; Ворошилов и др., 2021; Баранов и др., 2023] и сдвиговыми деформациями в

их пределах [Сорохтин и др., 2022]. Возраст сравнительно небольших долин оценивается как позднеплейстоценовый (сартанский) [Замотина, 2024], и соответствует этапу активизации эрозионной деятельности на шельфе Карского моря в перигляциальной обстановке.

Значительное влияние на формирование микро- и мезорельефа в голоцене, а также на локализацию проявлений дегазации оказали процессы криогенеза, получившие широкое развитие на всей территории Западно-Сибирской равнины и прилегающих шельфовых районах [Трофимов, 1987; Бондарев и др., 1999]. Наиболее существенным фактором явилось формирование мерзлых толщ в верхней части осадочного разреза, мощность которых на шельфе Карского моря оценивается в десятки метров (до 100 м) [Данилов и др., 1999; Рокос и др., 2009; Перлова и др., 2017]. Отличительной особенностью Южно-Карской впадины является распространение на большей ее части под покровом четвертичных осадков палеоцен-миоценовых алевролитов, аргиллитов и глин, перекрывающих позднемеловые осадочные комплексы [Красножен и др., 2022]. Предположительно верхние горизонты палеогеновых отложений наряду с четвертичной частью разреза также подверглись промерзанию в сартанское время [Данилов и др., 1999], сформировав массивный флюидоупор.

Рассматриваемые три участка палеодолин расположены к северо-западу от о-ва Белый (рис. 1А), на участке шельфа, характеризующемся значительной расчлененностью поверхности дна. ММП имеют здесь островное распространение (рис. 1Б).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использованы батиметрические данные, полученные при помощи многолучевых эхолотов Reson Seabat 8111 с частотой сигнала 100 кГц и Reson Seabat T-50 ER с вариативными частотными характеристиками сигнала от 160 до 400 кГц. Представленные в работе ЦМР имеют разрешение ячейки сетки, соответствующее размеру 10×10 м. Сейсмоакустические разрезы получены на параметрическом профилографе Parasound P-35 в двух частотных каналах: 1) 2–8 кГц для визуализации ВЧР; 2) 18–21 кГц для отображения акустических аномалий в водной толще.

Полигон 1 представляет собой южный участок съемки 2021–2023 гг. (52-й и 56-й рейсы НИС «Академик Николай Страхов») площадью около 147 км<sup>2</sup>. Межгалсовое расстояние на полигоне 1 изменялось от 250 до 400 м. Площадь отснятого участка дна на полигоне 2 составила 77 км<sup>2</sup>, при значениях межгалсового расстояния от 175 м в южной части полигона (данные 52-го рейса НИС

«Академик Николай Страхов») и до 350 м на остальной площади съемки (данные 56-го рейса НИС «Академик Николай Страхов»). Площадь покрытия батиметрической съемкой на полигоне 3 составила 75 км<sup>2</sup> при межгалсовом рассто-

янии около 400 м. Проникновение акустического сигнала профилографа в осадки изменялось от 0–1 до 15–30 м, средние значения мощности изученной части разреза составили около 10 м от поверхности дна.

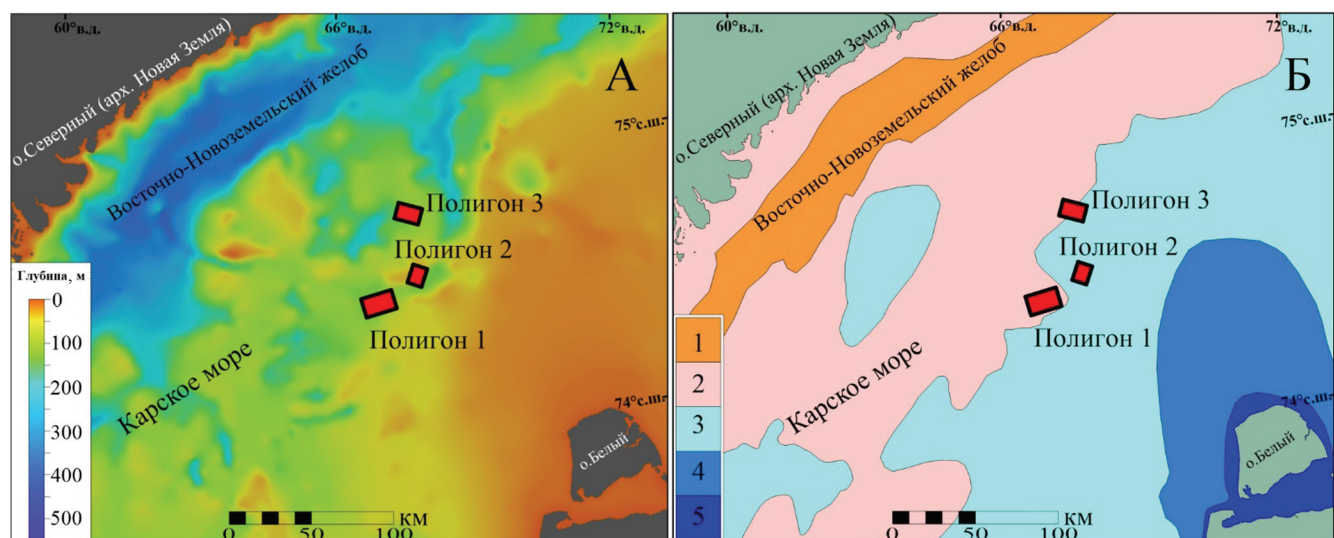


Рис. 1. Рельеф дна и распространение субаквальной мерзлоты на шельфе Карского моря:

А – положение полигонов исследования; Б – мощность ММП на шельфе Карского моря (по данным [Перлова и др., 2017]).

Рельеф дна приведен по данным [Jacobsson et al., 2020]: 1 – районы, где ММП отсутствуют; области распространения:

2 – охлажденных пород; 3 – охлажденных пород и островного развития ММП мощностью до 50 м (температура пород от 0 до –1°C);

4 – охлажденных пород и островного развития ММП мощностью до 50 м (температура пород около –1°C);

5 – сплошного развития ММП мощностью до 100 м (температура пород от –1 до –2°C)

Fig. 1. Bottom relief and distribution of subaqueous permafrost on the shelf of the Kara Sea:

A – the position of the study sites; B – the thickness of the permafrost on the shelf of the Kara Sea (according to [Perlova et al., 2017]).

The bottom relief is shown according to [Jacobsson et al., 2020]: 1 – areas where permafrost are absent; areas of distribution:

2 – cooled rocks, 3 – cooled rocks and island development of permafrost with a capacity of up to 50 m (rock temperature from 0 to –1°C),

4 – cooled rocks and island development of permafrost with a capacity of up to 50 m (rock temperature about –1°C),

5 – continuous development of permafrost with a capacity of up to 100 m (rock temperature from –1 to –2°C)

Непрерывное сейсмическое профилирование (НСП) производилось на сейсмостанции MultiJack 25000HP 12.0 с использованием электроискрового источника SWS-25000 в диапазоне частот от 60 до 1200 Гц. Проникновение в осадки на исследуемом полигоне составило 50–75 м. В качестве приемника применялась буксируемая гидрофонная одноканальная сейсмокося.

Процесс выявления и пикировки акустических аномалий, связанных с газонасыщенностью в ВЧР, осуществлялся в программном пакете Kingdom Suite 2015. На 2D-разрезах выделялись аномалии типа «яркое пятно» и «плоское пятно» с последующим наложением шейп-файла на цифровую модель рельефа для визуализации пространственной проекции газовых аномалий на поверхность современного рельефа. На основе анализа акустической картины верхней части осадочного чехла были выделены четыре типа (А, Б, В, Г) приповерхностных сейсмоакустических разрезов, описание которых приведено далее в тексте.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках выполненных работ дана характеристика морфологии рельефа, закономерностей строения верхней части осадочного чехла и проявлений дегазации на трех полигонах к северо-западу от о. Белый на глубинах от 40–45 до 240–290 м. Все исследованные полигоны охватывают фрагменты палеодолин, расположенные на небольшом (до 50 км) расстоянии друг от друга, относящихся к единому бассейну, существовавшему до начала затопления территории в голоцене.

На полигоне 1 ширина палеодолины по бровкам составляет от 6 до 8,5 км, поперечный профиль ее ящикообразный, бровки и тыловые швы днища четкие. Глубина на бровках составляет 60–80 м, в тальвеге палеодолины – 250–300 м. В днище выделяется несколько фрагментов террасовидных площадок на глубине 120–140 м, вероятно, представляющих собой останцы речных террас (рис. 2А).



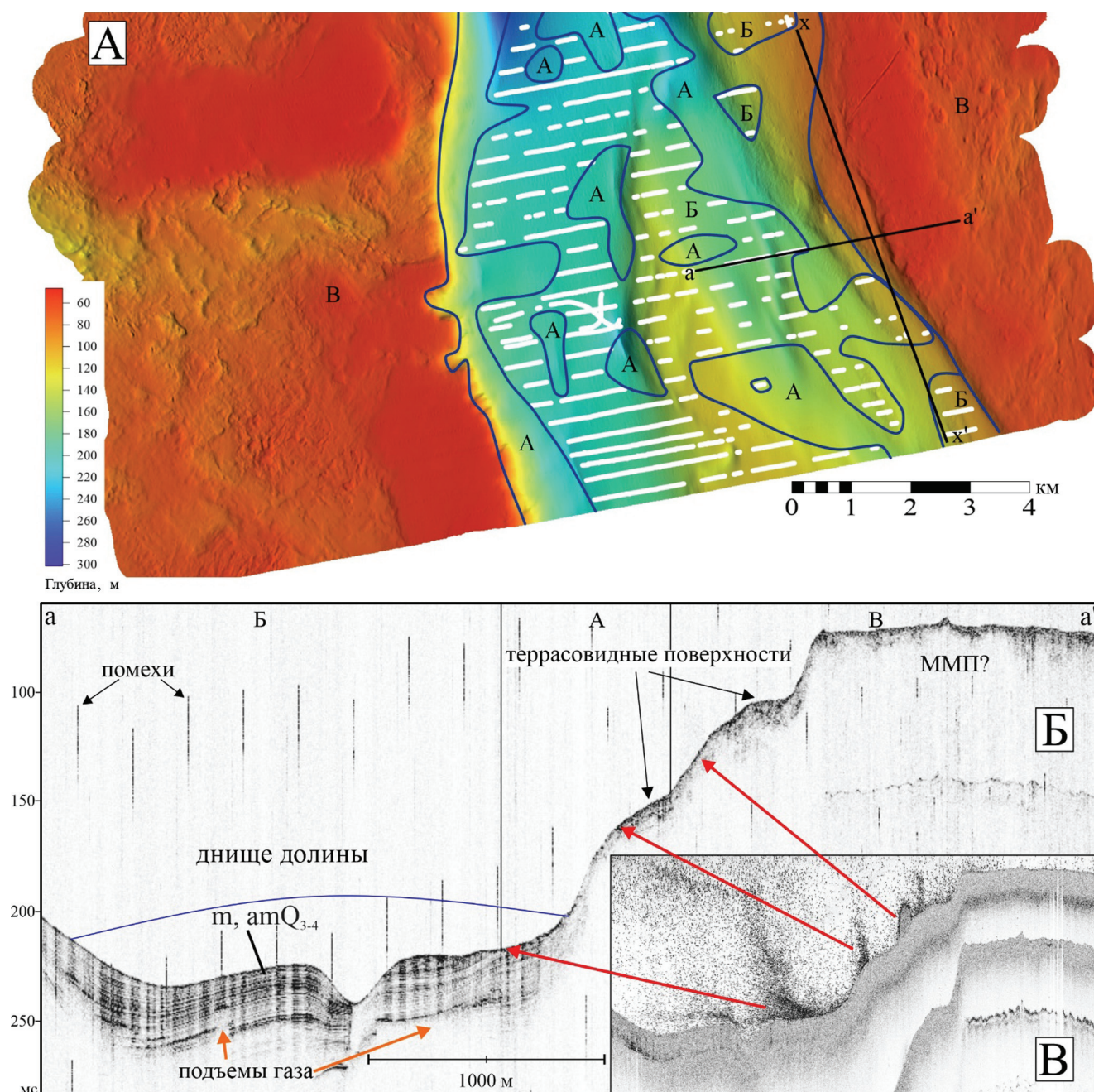


Рис. 2. Рельеф дна и осадочный чехол полигона 1:

А – рельеф дна по данным многолучевой батиметрии (прерывистыми белыми линиями показаны участки выявленных сейсмоакустических аномалий типа «яркое пятно», связанных с дегазацией); Б – строение верхней части осадочного чехла; В – газопроявления в водной толще (по данным высокочастотного акустического профилирования во время 52-го и 56-го рейсов НИС «Академик Николай Стрехов»)

Fig. 2. Relief of the bottom and sedimentary cover of polygon 1:

А – the bottom relief according to multipath bathymetry data (intermittent white lines show areas of detected “bright spot” acoustic anomalies associated with degassing); Б – the structure of the upper part of the sedimentary cover; В – gas occurrences in the water column according to high-frequency acoustic profiling data from 52 and 56 cruises of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov”

По данным высокочастотного сейсмоакустического профилирования предполагается, что палеодолина выработана в дочетвертичных осадочных породах и перекрыта морскими осадками. Характер осадочного заполнения рыхлым материалом указывает на наличие как минимум двух генераций осадочных толщ, сформированных в различных ги-

дродинамических условиях. В некоторых участках днища долины выделяется положительная аккумулятивная форма (вал), сложенная хорошо проницаемыми стратифицированными осадками, которая по характерным морфологическим признакам интерпретируется как каналный дрейф [Baranov et al., 2024]. Аналогичная форма ранее была описана в



днище похожей палеодолины в 200–220 км юго-западнее рассматриваемого полигона [Баранов и др., 2023]. В южном сегменте полигона 1, рассматриваемом в данном исследовании, наблюдается преимущественно обтекание палеорельефа позднечетвертичными морскими / аллювиально-морскими стратифицированными осадками, выполняющими современный рельеф палеодолины. Они прослеживаются как в днище, так и на террасовидной поверхности. Суммарные видимые мощности морских осадков достигают 50–70 м в наиболее глубокой части днища долины и до 10–15 м на террасовидной поверхности. Ниже акустический сигнал профилографа не проникает, что объясняется наличием фрагментов ММП и / или газонасыщенностью осадков. Аналогичная акустическая картина наблюдается на временном разрезе НСП, пересекающем выступ коренного склона палеодолины (рис. 3). На профиле (см. рис. 3) под дном отмечается зона хаотизации отражений при переходе от террасовидной поверхности к прибрежной части склона, фиксирующая резкое изменение плотностных свойств пород на борту долины. За бровками долины признаком распространения многолетнемерзлых толщ являются наличие участков с хаотичной сейсмозаписью, а также расчлененный микрорельеф междуречных пространств, обыкновенно образующийся при деградации мерзлоты (denuded terrain по [Paull et al., 2022]). Предполагаемая мощность четвертичных позднелайстоцен-голоценовых отложений вне днища долины выше, однако, из-за близкого расположения к поверхности дна газового фронта и фрагментов ММП оценить ее не представляется возможным.

В пределах исследуемого участка выделены три типа строения сейсмоакустического разреза (А, Б и В), распространение которых, в целом, достаточно хорошо коррелирует со строением рельефа дна. Сейсмоакустические разрезы типов А и Б характерны для днища палеодолины. Первый тип разреза (А, см. рис. 2Б) соответствует акустически хорошо проницаемым стратифицированным осадкам морского, и, возможно, аллювиально-морского генезиса без признаков газонасыщенности. Он распространен как в наиболее глубокой части днища палеодолины, так и на террасовидных поверхностях. Второй тип сейсмоакустического разреза (Б) распространен в днище долины на глубинах от 140 до 260 м и характеризуется обилием газопроявлений, выраженных в виде акустических аномалий типа «яркое пятно». Данный сейсмоакустический разрез характерен для валов и небольших ложбин, образованных при формировании приповерхностных тонкослоистых осадочных горизонтов на дне долины. Реже сейсмоакустический разрез типа А наблюдается на наиболее низкой террасовидной поверхности. На глубине менее 70–90 м в пределах верхних частей коренных склонов палеодолины и соседствующих с ними палеомеждуречных пространств распространен сейсмоакустический разрез типа В. Отражающие горизонты, соответствующие разрезу этого типа, имеют преимущественно хаотический характер. Глубина проникновения акустического сигнала в осадки минимальна (первые метры), на отдельных участках отражения ниже поверхности дна и вовсе отсутствуют.

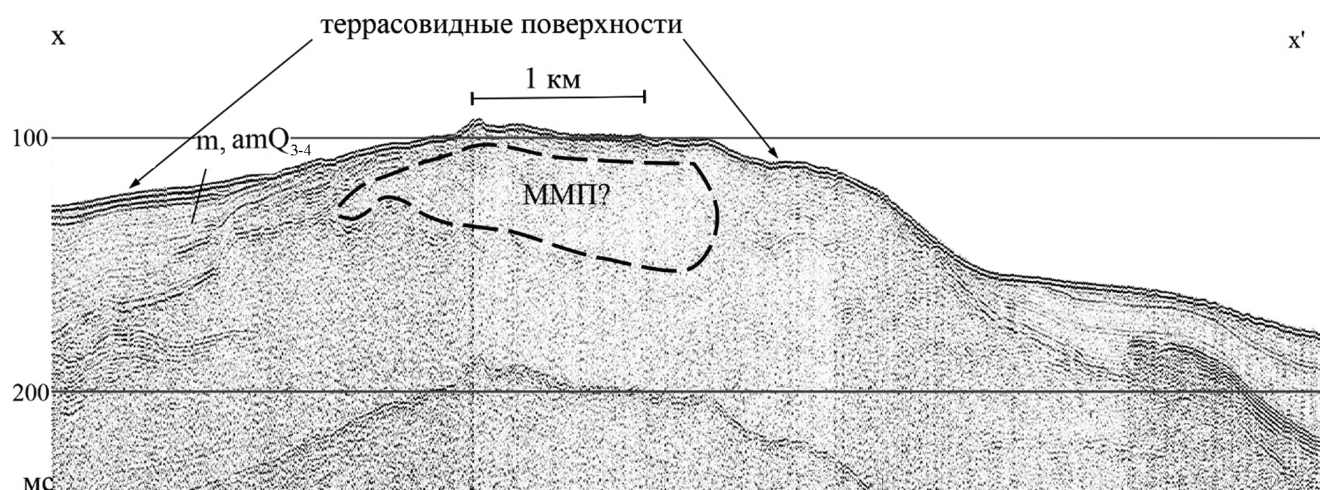


Рис. 3. Строение верхней части осадочного чехла на полигоне 1 (по данным НСП во время 56-го рейса НИС «Академик Николай Страхов»). Пунктирным черным контуром показана зона хаотизации рефлекторов, ассоциируемая с частично мерзлыми толщами. Положение профиля показано на рис. 2

Fig. 3. The structure of the upper part of the sedimentary cover at polygon 1 according to the sparker seismic section (56 cruise of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov”). The dotted black outline shows the zone of chaotic reflectors associated with partially frozen strata. The profile position is shown in fig. 2

По результатам пикирования временных разрезов профилографа определены закономерности распределения акустических аномалий, свидетельствующих о присутствии газонасыщенных пород в верхней части осадочного чехла (см. рис. 2А). Установлена характерная концентрация аномалий внутри палеодолины и практически их отсутствие на прилегающих забровочных пространствах. Газопроявления обнаруживаются в приповерхностных рефлекторах в виде «ярких» и «плоских» пятен с наличием зон потери когерентности сигнала по латерали ниже по разрезу. Отличительной особенностью является наличие газового фронта в осадках, слагающих террасовидные поверхности в днище долины. Яркие рефлекторы кровли газонасыщенных отложений имеют волнистый характер и в ряде случаев поднимаются к поверхности дна в виде вертикальных клиньев. Размер таких подъемов кровли газового фронта на профиле составляет до 150–200 м в ширину.

Несмотря на многочисленные признаки газонасыщенности осадков, заполняющих днище долины, поверхностные проявления дегазации в виде флюидогенных форм или выходов газа в водную толщу отсутствуют. Характер аномалий акустического поля водной толщи представлен скоплениями звукорассеивающих объектов небольшого размера типа пузырей газа. Акустическая картина водной толщи над террасовидными поверхностями в долине фиксирует вертикальные и субвертикальные подъемы взвеси от поверхности дна, инициируемые прорывами газа на высоту до 25 м (см. рис. 2В). Полученные данные могут указывать на фрагментарное распространение многолетнемерзлых пород сниженной мощности в строении склонов палеодолины. Вероятно, здесь происходит разгрузка флюидов, скапливающихся под толщей мерзлоты в пределах забровочных пространств, прилегающих к аллювиально-морской равнине.

Полигон 2 расположен в 20 км к востоку от полигона 1. Многолучевым эхолотированием обследован фрагмент палеодолины на глубинах от 50 м (близ бровки) до 90–100 м (в днище) (рис. 4А). Поперечный профиль палеодолины корытообразный, бровки и тыловые швы днища – нечеткие, плавные. Юрность в строении рельефа днища долины не выражена, в целом оно полого наклонено к северу.

По результатам интерпретации акустических и батиметрических данных выделены четыре типа сейсмоакустического разреза, которым соответствуют характерные формы рельефа и подстилающие их осадочные толщи.

Наиболее распространен сейсмоакустический разрез типа Б, приуроченный к диапазону глубин

45–100 м (см. рис. 4Б), которым соответствуют значительная часть днища палеодолины, а также фрагмент ее пологого коренного склона в северо-восточной части полигона. Характер отражающих горизонтов в целом имеет аналогичный полигону 1 стратифицированный вид. Отличием является отсутствие выраженного в рельефе аккумулятивного тела типа канального дрефта в днище долины и наличие волнистых и псевдоскладчатых деформаций в верхней части разреза, амплитуда которых увеличивается при подъеме на пологий склон долины в северо-восточной части полигона. Подобная акустическая картина может отражать как первоначальное формирование осадочной толщи в условиях активной гидродинамики, так и постседиментационные изменения, связанные, в том числе с развитием склоновоморских деформаций. Наибольшая плотность газовых аномалий типа «яркое пятно», а также четко выделяемые в стратифицированных осадках подъемы газового фронта конической формы приурочены к приподнятой южной части днища палеодолины.

Сейсмоакустический разрез типа А имеет фрагментарное распространение в днище палеодолины, что, вероятно, объясняется несколько более глубоким положением газового фронта и позволяет говорить о неравномерном подъеме флюида к поверхности. Учитывая невысокую проницаемость сигналом профилографа поверхностных осадков (до 15 м), можно предполагать единый механизм развития дегазации для всей площади днища палеодолины, где наблюдаются сейсмоакустический разрез типов А и Б.

Как и на полигоне 1 в верхней части коренных склонов и за бровками палеодолины на глубинах 45–55 м распространен сейсмоакустический разрез типа В. Исключение составляет северо-восточная часть полигона, где сейсмоакустический разрез типа Б распространен и за бровкой палеодолины. Рельеф забровочных пространств характеризуется большей выровненностью в сравнении с полигоном 1. Локально встречаются редкие ППФ (до 180–200 м в поперечнике, высотой до 2 м), приуроченные в основном к прибровочным участкам палеомеждуречных пространств. Для области распространения сейсмоакустического разреза типа В предполагается мерзлое или частично мерзлое состояние отложений верхней части разреза с вероятным наличием локальных несквозных таликов. Газопроявления в осадках и водной толще на участках распространения разреза типа В не выявлены, единственным признаком развития дегазации является наличие редких ППФ.

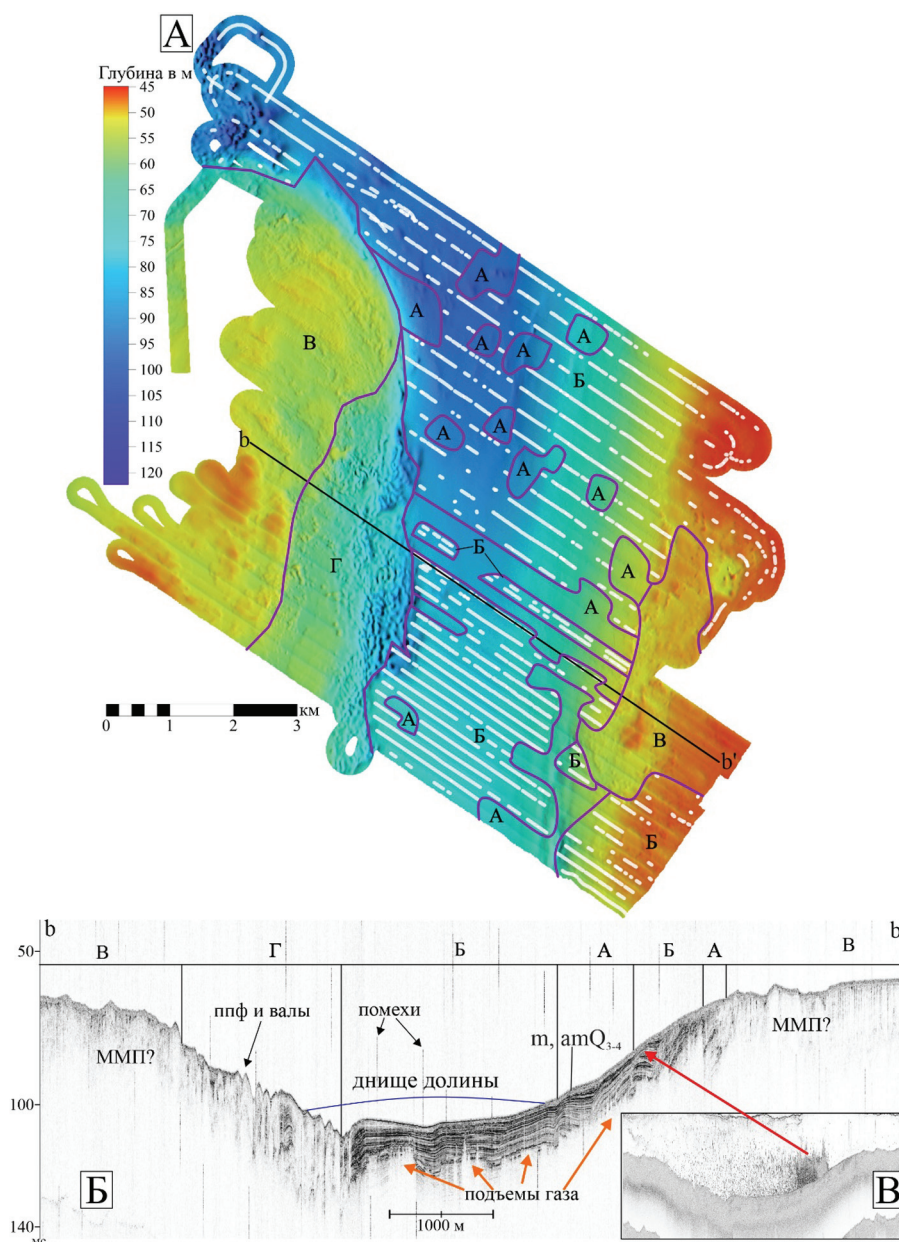


Рис. 4. Рельеф дна и осадочный чехол полигона 2:

А – рельеф дна по данным многолучевой батиметрии (прерывистыми белыми линиями показаны участки выявленных сейсмоакустических аномалий типа «яркое пятно», связанных с дегазацией); Б – строение верхней части осадочного чехла; В – газопроявления в водной толще (по данным высокочастотного акустического профилирования во время 52-го и 56-го рейсов НИС «Академик Николай Страхов»)

Fig. 4. Relief of the bottom and sedimentary cover of polygon 2:

A – the bottom relief according to multipath bathymetry data (intermittent white lines show areas of detected «bright spot» acoustic anomalies associated with degassing); Б – the structure of the upper part of the sedimentary cover; В – gas occurrences in the water column according to high-frequency acoustic profiling data from 52 and 56 cruises of the R/V «Akademik Nikolaj Strakhov»

В западной части дна долины и на прилегающем ее пологом коренном склоне на глубинах 55–95 м установлено наличие расчлененного холмисто-грядового микрорельефа, предположительно, флюидогенного и термокарстового генезиса. Формы представлены многочисленными ППФ, воронками, валами, грядами и сопряженными с ними западинами. Относительный перепад высот составляет от 2 до 5 м, границы форм четкие,

резко выраженные. В данной области выделен отдельный тип сейсмоакустического разреза – тип Г, отличающийся преобладанием рефлекторов хаотичной и параболической геометрии с небольшим (до 3 м) проникновением сигнала в осадки. По латерали граница между разрезами типов А, Б и Г имеет четкий характер, отражающий резкое изменение плотностных свойств приповерхностных осадков (см рис. 4В).



В области распространения сейсмоакустического разреза типа Г установлено направленное изменение морфологии микрорельефа сверху вниз по поперечному профилю склона долины. Так, на глубинах 70–90 м (в районе тылового шва днища палеодолины) преобладают воронкообразные и грядовые формы, что, по-видимому, объясняется меньшей мощностью мерзлого слоя и присутствием на сейсмоакустических разрезах фрагментов стратифицированных осадков на фоне общего хаотичного рисунка рефлекторов. Выше изобаты 70 м рельеф менее амплитудный и представлен преимущественно изометричными ППФ разного размера. Данная особенность косвенным образом указывает на увеличение сплоченности и/или мощности ММП при подъеме на склон палеодолины. В верхней части склона ММП характеризуются сравнительно большей мощностью, выступают в роли флюидоупора, и дегазация сопровождается формированием ППФ. В нижней части склона и на уровне днища палеодолины выход флюидов к поверхности дна облегчается фрагментарным распространением мерзлоты, здесь формируются, в том числе покмарки. На развитие процессов подъема флюидов в водную толщу указывают и акустические данные. Так, выходы газа в водную толщу зафиксированы на юго-восточном борту долины (см. рис. 4В) в виде облака взвеси высотой до 15 м. Как и на полигоне 1, этот участок разгрузки флюидов приурочен к перегибу рельефа – подножью склона палеодолины, где происходит сокращение мощности, а возможно и вовсе выклинивание основного флюидоупора – толщи многолетнемерзлых пород.

Полигон 3 располагается к северу от полигона 2 на глубинах от 50 до 200 м. Облик рельефа имеет здесь контрастный характер. Ширина палеодолины, имеющей корытообразный поперечный профиль и нечеткие бровки, составляет 7–8 км (рис. 5А). Пологие склоны и днище палеодолины осложнены большим количеством флюидогенных форм, представленных изометричными холмами, изолированными куполовидными поднятиями и покмарками.

Осадочный чехол на полигоне представлен стратифицированными морскими осадками видимой мощностью 10–15 м. Характер распределения типов сейсмоакустического разреза в изученной палеодолине более мозаичный в сравнении с полигонами 1 и 2. Типы разреза А и Б также наиболее распространены в днище палеодолины, но отсутствует их выраженная связь с гипсометрическим положением и формами рельефа. На полигоне 3 увеличивается (в сравнении с полигонами 1 и 2) площадь распространения в верхней части разреза стратифицированных, хорошо проницаемых осад-

ков, которые слагают как субгоризонтальные, так и слабонаклонные поверхности, а также участвуют в строении куполообразных поднятий и изометричных холмов.

Куполовидные поднятия изометричной и продолговатой формы имеют относительную высоту над поверхностью дна до 30–35 м, при ширине вершинной части до 650 м. На поверхности отдельных форм имеются небольшие покмарки (до 1–3 м глубиной и 20–40 м в диаметре), что позволяет предполагать флюидогенную природу куполовидных поднятий. Выпуклый рисунок рефлекторов указывает на то, что формирование куполовидных поднятий происходило синхронно или же после накопления осадочного материала в днище палеодолины и имеет, по всей видимости, экструзивный характер.

Аналогичными по генезису формами являются и вышеупомянутые холмы, высотой до 1–2 м, с диаметром основания до 40 м, развитые преимущественно в области распространения сейсмоакустического разреза типа Б (см. рис. 5). При детальном рассмотрении сейсмоакустических разрезов профилографа под холмиками отчетливо фиксируются подъемы газового фронта (рис. 6), а также налегание слагающих их осадков на морские отложения, залегающие на поверхности дна. Отмечается группировка в цепочки и площадное распространение данных образований в восточной части полигона. Учитывая морфологию и внутреннее строение данных форм, можно предположить их флюидогенное происхождение и отнести к грязевулканическим образованиям.

Сейсмоакустический разрез типа В распространен в пределах полигона как на приподнятых палеомеждуречных уровнях и в верхних частях склонов палеодолины, так и в пределах днища палеодолины под куполообразными поднятиями и участками хаотичной денудированной поверхности типа *denuded terrain* [Paull et al., 2022].

Следует отметить, что практически на всей территории полигона в области распространения сейсмоакустических разрезов типов А, Б и В встречаются хорошо выраженные в рельефе многочисленные покмарки диаметром до 50 м и глубиной до 15 м. Судя по морфологической «свежести», эти формы совсем молодые. Сам факт их наличия свидетельствует о хорошей проницаемости донных осадков и свободной разгрузке флюидов. Вероятно, многолетнемерзлые породы на рассматриваемом полигоне в настоящее время полностью отсутствуют. Дополнительно на это указывает отсутствие сфокусированных выходов газа на полигоне, которые, как было показано выше, обычно приурочены к участкам выклинивания мерзлых толщ на бортах долин. Таким образом, в условиях отсутствия флюидоупо-



ра в виде толщи ММП и хорошей проницаемости донных отложений, дегазация носит рассеянный характер и сопровождается формированием типич-

ных флюидогенных форм (покмарок, грязевулканических построек и куполовидных поднятий) как на склонах, так и в днище палеодолины.

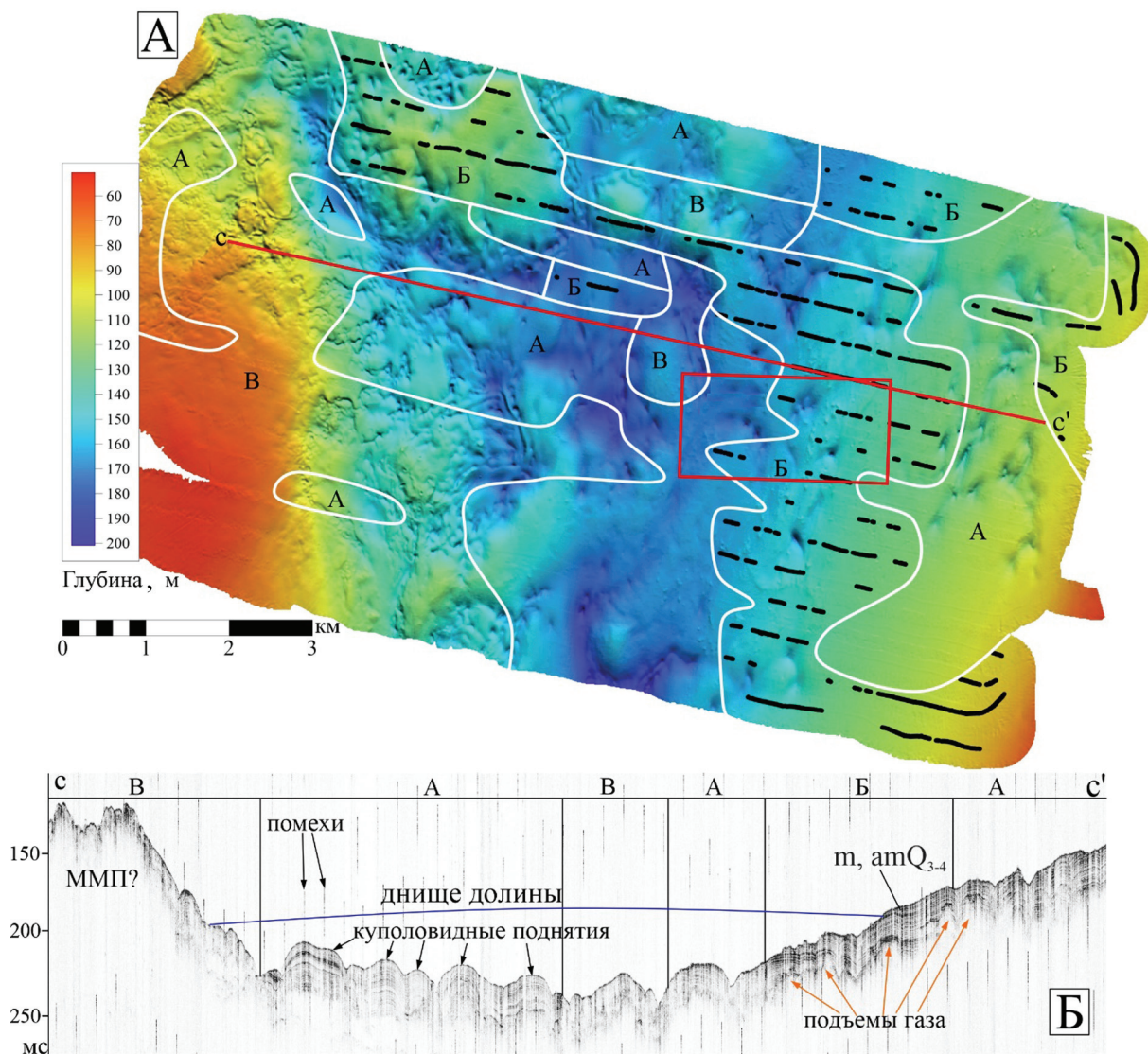


Рис. 5. Рельеф дна и осадочный чехол полигона 3:

А – рельеф дна по данным многолучевой батиметрии (прерывистыми черными линиями показаны участки выявленных сейсмоакустических аномалий типа «яркое пятно», связанных с дегазацией); Б – строение верхней части осадочного чехла (по данным высокочастотного акустического профилирования во время 56-го рейса НИС «Академик Николай Страхов»).

Прямоугольником показано положение участка, изображенного на рис. 6

Fig. 5. Relief of the bottom and sedimentary cover of polygon 3:

А – the bottom relief according to multipath bathymetry data (intermittent black lines show areas of detected “bright spot” acoustic anomalies associated with degassing); Б – the structure of the upper part of the sedimentary cover according to high-frequency acoustic profiling data from 56 cruises of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov”. The rectangle shows the position of the area shown in Fig. 6

На основе сейсмоакустической и геоморфологической интерпретации фактического материала, полученного в ходе исследования палеодолин внеледниковой части шельфа Карского моря, можно реконструировать последовательность формирования флюидогенного рельефа в связи с эволюцией палеогеографической обстановки в позднем плейстоцене

и голоцене. Предполагается, что сформированная к сартанскому времени в приямальской области шельфа Карского моря зона аккумуляции аллювиально-морских осадков (дельтовых), где расположены рассмотренные в работе полигоны, в течение сартанской регрессивной фазы находилась в перигляциальной зоне. Ведущими процессами рельефо-

образования являлись криогенные и флювиальные. Рассматриваемые участки палеодолин представляли собой частично затопленные понижения. Их борта, междолинные пространства и, локально, днища были охвачены процессами криогенеза, что привело к промерзанию слабоконсолидированных толщ терригенных осадков на значительную глубину [Overduin et al., 2019; Мельников, Спесивцев, 1995; Данилов, 2000]. В наиболее глубоких частях долин под руслами, по-видимому, аналогично речным системам северной части Западной Сибири, располагались гидрогенные талики [Романовский, 1972]. По результатам моделирования, при средних значениях теплового потока для южной части шельфа Карского моря  $50 \text{ мВт/м}^2$  [Хуторской и др., 2013] предполагается широкое распространение сплошной мерзлоты до изобаты 80 м и островное до изобаты 120 м [Гаврилов и др., 2019].

Сохранность ММП на шельфе Карского моря обусловлена отрицательными придонными температурами воды [Overduin et al., 2019], которые в диапазоне глубин 35–200 м имеют постоянные значения от  $-1,6$  до  $-1,8^\circ\text{C}$  [Розенбаум, Шполянская, 2000; Галушкин, 2023] и не подвержены сезонным колебаниям. При такой температуре донной воды можно предполагать, что деградация ММП с поверхности происходит медленно, а наиболее существенное влияние оказывает геотермический градиент.

Различия в строении образовавшейся в разных геоморфологических позициях толщи ММП и, как следствие, разные темпы ее деградации в период голоценовой трансгрессии представляются наиболее

вероятными причинами выявленных закономерностей проявлений дегазации в палеодолинах Карского шельфа. Основную роль в перераспределении поднимающихся флюидов играют мощность и степень сплоченности ММП, которые, в свою очередь, во многом зависят от абсолютных отметок поверхности дна. Так, более мелководные территории (на глубинах менее 50 м) подверглись более интенсивному промерзанию, тогда как в днищах палеодолин (в т. ч. палеозаливов, образовавшихся в результате ингрессии) располагались подрусловые талики. Согласно полученным результатам, толщи ММП в днищах изученных палеодолин имеют островное распространение, а на отдельных участках и вовсе отсутствуют. Таким образом, днища палеодолин выступают в роли каналов для беспрепятственного подъема флюидов к поверхности дна. В то же время, как было отмечено на полигоне 3, подъем флюидов даже в таких благоприятных для свободной дегазации обстановках может приводить к подъему поверхности и формированию положительных куполовидных поднятий.

Рассмотренные полигоны, находящиеся на сравнительно небольшом (до 50 км) удалении друг от друга, характеризуются сходным набором типов сейсмоакустических разрезов, однако их рельеф и типы газопроявлений существенно различаются. Основным фактором, предопределившим современный облик рельефа исследованных полигонов, является гипсометрический уровень днища палеодолин, определивший геокриологическое строение верхней части разреза, а также связанный с ним характер проявления дегазации.

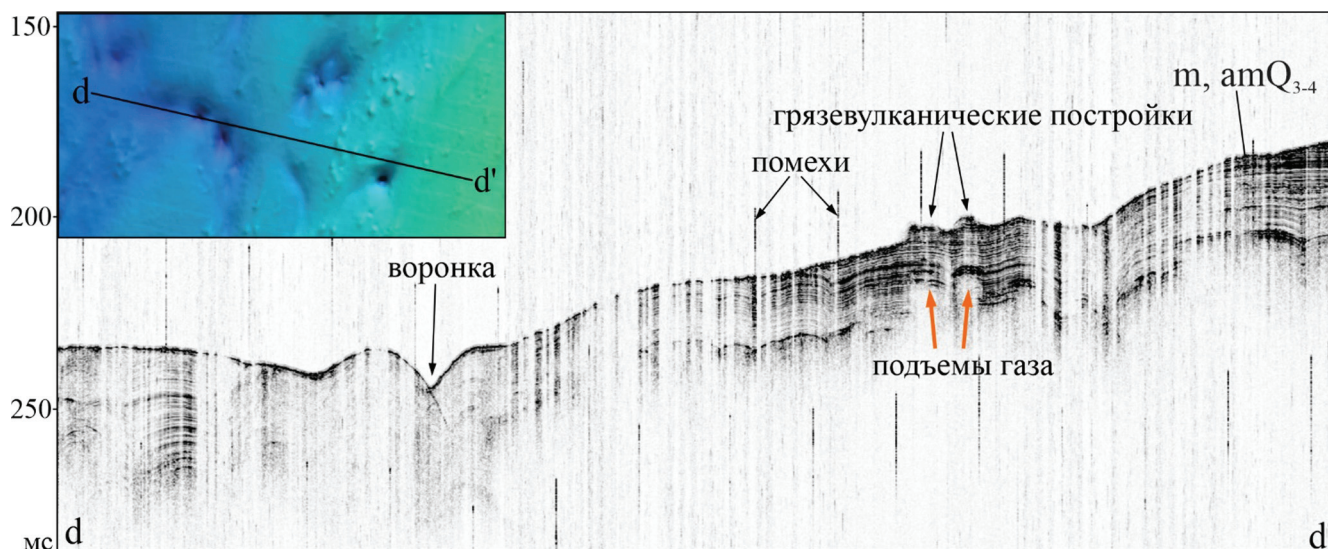


Рис. 6. Рельеф дна (во врезке) и строение верхней части осадочного чехла на полигоне 3 (по данным высокочастотного акустического профилирования во время 56-го рейса НИС «Академик Николай Страхов»)

Fig. 6. Bottom relief (inset) and the structure of the upper part of the sedimentary cover at polygon 3 according to high-frequency acoustic profiling data from 56 cruise of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov”



В частности, палеодолина на полигоне 1 имеет наибольшую глубину (до 290 м). Распределение типов сейсмоакустических разрезов четко маркирует протаявшие или же и вовсе не охваченные процессами криогенеза участки в днище и слабodeформированную поверхность бортов и прибрежных участков. Прорыв газа в водную толщу происходит в местах выклинивания мерзлых толщ на склонах долины с образованием вертикальных «факелов» взвешенных частиц на высоту более 30 м над поверхностью дна. Вероятно, миграция флюидов к этим зонам разгрузки происходит во многом с прилегающих забровочных пространств, где свободно поступлению флюидов к поверхности препятствует наличие мощной толщи ММП.

Палеодолина, расположенная на полигоне 2, характеризуется меньшей глубиной и в период сартанской регрессии, скорее всего, полностью осушалась. Это привело к промерзанию не только забровочных пространств, но также частично и днища долины. Полученные данные указывают на существование в настоящее время фрагментов ММП на глубинах от 0 до 5 м от поверхности дна в области распространения сейсмоакустического разреза типа Г на склонах и днище долины, а также в пределах забровочных пространств. Деградация мерзлоты сопровождается образованием расчлененного рельефа типа *denuded terrain* и формированием ППФ. На участках, где мерзлота отсутствует, вследствие дегазации образуются покмарки. Участки сфокусированного выхода газа также фиксируются на участках выклинивания ММП на склонах долины.

В пределах палеодолины, изученной на полигоне 3, ММП имеют наименьшие площади распространения. Это может быть связано с глубиной вреза палеодолины, которая достигает 200 м. В период сартанской регрессии, вероятно, под затопленным днищем прослеживалась островная мерзлота, позднее деградировавшая. Мозаичный характер распределения всех типов сейсмоакустического разреза и отсутствие сфокусированных выходов газа в водную толщу указывает на рассеянный характер дегазации при участии грязевулканических процессов.

Результаты исследования хорошо согласуются с выводами, полученными зарубежными учеными при изучении обстановок дегазации в канадском секторе арктического шельфа. В частности, по результатам исследований газопоявлений в дельте р. Маккензи и на шельфе моря Бофорта [Grob et al., 2023; Dallimore et al., 2024; Paull et al., 2024] интенсивность дегазации напрямую коррелирует с мощностью и состоянием реликтовых ММП. Толща ММП в пределах шельфа моря Бофорта имеет максимальную мощность до 250 м вблизи прибрежных территорий, а в сторону бровки шельфа постепенно

истончается и выклинивается вследствие растепления и деградации на современном этапе развития. В прибрежной части шельфа, где сплоченность и мощность ММП крайне невелики, формируется рельеф типа *denuded terrain* и дегазация проявляется в формировании куполовидных поднятий и ППФ [Paull et al., 2024]. Как показано на примере дельты р. Маккензи [Dallimore et al., 2024], именно талики, обеспечивающие проницаемость верхней части разреза в палеоруслах и дельтах рек, являются основными каналами выхода флюидов к поверхности дна.

Результаты наших исследований позволяют предполагать схожий характер вертикальной миграции флюидов в исследуемой части Карского моря, где мощности и площади распространения субаквальных ММП сокращаются при движении на северо-запад от п-ова Ямал и о-ва Белый, по всей видимости, формируя аналогичный выступ клиновидной формы, выявленный на шельфе моря Бофорта. Одним из механизмов, усиливающих приток флюидов, является миграция пресных вод с Ямала вдоль подошвы ММП и их разгрузка на изобате приблизительно равной 45 м, маркирующей краевую часть данного клина [Semenov et al., 2019].

Таким образом, в палеодолинах юго-западной части Карского шельфа существуют особые обстановки дегазации, что предопределено геоморфологическим и геокриологическим строением рельефа дна. Подъем флюидов из недр приводит к их скоплению близ поверхности дна. В зависимости от сочетания геоморфологических и геокриологических условий, направления и интенсивность их миграции изменяются по латерали.

В наиболее глубоких долинах (примером является долина, изученная на полигоне 1), в днище которых даже в сартанское время существовали талики и ММП отсутствуют, подъем флюидов имеет рассеянный характер и крупных флюидогенных форм не образуется. На бортах таких долин, где выклиниваются ММП, распространенные на забровочных пространствах, происходит разгрузка флюидов с образованием участков повышенной мутности водной толщи (рис. 7А). Для менее глубоких долин (таких, как были изучены на полигонах 2 и 3), в днище которых в позднем плейстоцене существовала сплошная или островная мерзлота, характерно более широкое распространение флюидогенных форм, а также микрорельефа типа *denuded terrain* (сейсмоакустические типы В и Г), образованного в результате посткриогенных явлений (см. рис. 7Б).

Склоны палеодолин по косвенным признакам представляют собой участки, где мощность мерзлых толщ, слагающих забровочные пространства, снижается и они постепенно выклиниваются. Вероятно, характер проявления дегазации на склонах



связан, в том числе с их морфологией, в частности, с крутизной. На более крутых склонах мощность мерзлых толщ убывает быстрее и вблизи зоны выклинивания мерзлоты формируются вертикальные акустические аномалии в водной толще, указывающие на наличие сфокусированных выходов газа

(см. рис. 2А). На более пологих склонах в нижних частях бортов долины ММП бывают распространены фрагментарно и имеют небольшую мощность, разгрузка флюидов в таких условиях приводит, в том числе к формированию грязевулканических построек.

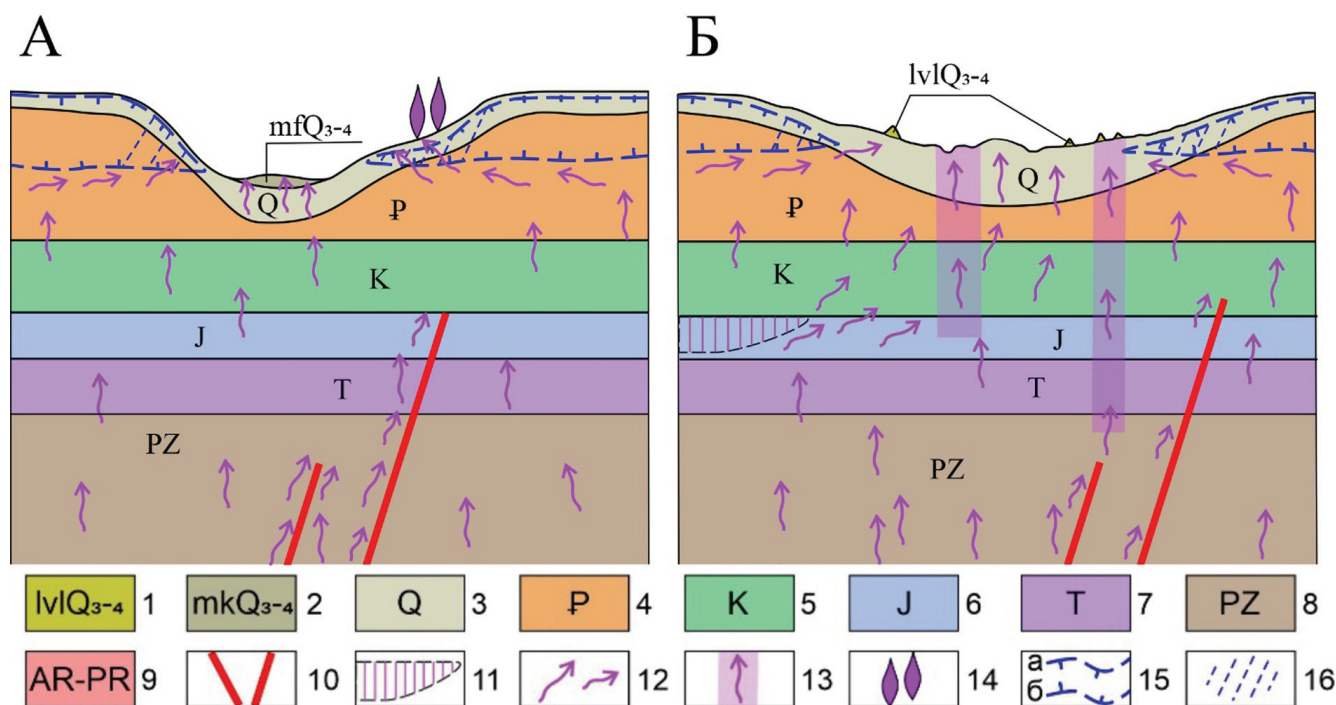


Рис. 7. Принципиальная схема развития дегазации в палеодолинах Карского шельфа:

А – в глубоких долинах, днище которых расположено на глубинах 200–220 м и более; Б – в неглубоких долинах, днище которых располагается на глубинах преимущественно менее 160–180 м. Стратиграфическая интерпретация согласно [Конторович и др., 2018]. Условные обозначения: 1 – грязевулканические отложения позднего плейстоцена и голоцена; 2 – каналные дрифты (мелководные контуристы) позднего плейстоцена и голоцена [Baranov et al., 2024]; 3 – нерасчлененные морские четвертичные осадки; 4 – породы палеогеновой системы; 5 – породы меловой системы; 6 – породы юрской системы; 7 – породы триасовой системы; 8 – нерасчлененные породы палеозоя; 9 – разрывные нарушения; 10 – пути миграции флюидов; 11 – вертикальные аномалии типа «факел» в водной толще; 12 – многолетнемерзлые породы (а – кровля, б – подошва); 13 – зоны сниженной мощности и сплоченности многолетнемерзлых пород

Fig. 7. Schematic diagram of the development of degassing in the palaeovalleys of the Kara shelf:

A – in deep valleys, the bottom of which is located at depths of 200–220 m or more; Б – in shallow valleys, the bottom of which is located at depths mainly less than 160–180 m. Stratigraphic interpretation according to [Kontorovich et al., 2018]. Symbols: 1 – mud volcanic deposits of the Late Pleistocene and Holocene; 2 – channel drifts (shallow contourites) of the Late Pleistocene and Holocene [Baranov et al., 2024]; 3 – undifferentiated marine Quaternary sediments; 4 – rocks of the Paleogene system; 5 – rocks of the Cretaceous system; 6 – rocks of the Jurassic system; 7 – rocks of the Triassic system; 8 – undifferentiated Paleozoic rocks; 9 – discontinuous faults; 10 – fluid migration routes; 11 – vertical anomalies of the “torch” type in the water column; 12 – permafrost rocks (a – ro, б – base); 13 – zones of reduced thickness and cohesion of permafrost rocks

## ВЫВОДЫ

Палеодолины юго-западной части Карского шельфа, расположенные в области развития ММП, являются районами активного проявления дегазации и развития форм флюидогенного происхождения. Приток флюидов к поверхности дна может происходить не только по вертикальным каналам, но также и по латерали с прилегающих пространств шельфа под подошвой толщи ММП.

Спектр развитых в палеодолинах флюидогенных форм определяется морфологией рельефа и глубиной: покмарки и грязевулканические постройки более характерны для днщ долин, где мерзлые породы распространены фрагментарно или вовсе отсутствуют; ППФ встречаются на склонах долин, где снижается мощность и сплоченность ММП. В пределах забровочных пространств газопроявления и флюидогенные формы единич-

ны, что связано с наличием флюидоупора в виде толщи ММП.

В настоящее время палеодолины приямальского сектора Карского шельфа представляют собой активные динамические системы взаимодействия процессов подъема глубинных флюидов с деградирующими массивами мерзлых пород. Наибольшая интенсивность дегазации и флюидогенного морфо-

литогенеза свойственна районам по периферии деградирующих фрагментов ММП.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке рисков, связанных с выбросами метана в условиях деградации ММП на шельфе, а также для прогнозирования локализации участков разгрузки флюидов на дне Карского моря.

**Благодарности.** Авторы выражают глубокую признательность научному коллективу 52-го и 56-го рейсов НИС «Академик Николай Страхов» (2021 и 2023 гг.) за содействие в получении и обработке данных. Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов Б.В., Амбросимов А.К., Мороз Е.А. и др. Позднечетвертичные контуритовые дрифты на шельфе Карского моря // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 2. С. 236–242.
- Богданов Н.А. Тектоника Арктического океана // Геотектоника. 2004. № 3. С. 13–30.
- Бондарев В.Н., Длугач А.Г., Костин Д.А. и др. Акустические фации посткриогенных обстановок мелководных районов Печорского и Карского морей // Разведка и охрана недр. 1999. № 7–8. С. 10–14.
- Верба М.Л. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–37.
- Вержбицкий В.Е., Косенкова Н.Н. и др. Геология и углеводородный потенциал Карского моря // Oil & Gas Journal. 2012. Т. 110. № 1. С. 48.
- Гаврилов А.В., Павлов В.А., Фриденберг А.И. и др. Геокриологическое картографирование шельфа Карского моря. Методика и результаты // Нефтяное хозяйство. 2019. № 11. С. 28–32.
- Галушкин Ю.И. Вариации климата в истории формирования Южно-Карского бассейна // Жизнь Земли. 2023. Т. 45. № 4. С. 490–504. DOI: 10.29003/m3531.0514-7468.2019\_45\_4/490-504.
- Данилов И.Д., Булдович С.Н., Луковкин Д.С. Модель динамики теплообмена в породах Карского шельфа и палеошельфа в позднем плейстоцене – голоцене и субмаринный криолитогенез // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 4. С. 54–60.
- Данилов И.Д. Субмаринная мерзлота арктического шельфа и связанные с ней процессы криогенного литоморфогенеза // Океанология. 2000. Т. 40. № 5. С. 756–764.
- Еременко Е.А., Кохан А.В., Мороз Е.А. и др. Условия, механизм и стадии развития пингоподобных форм на шельфе Печорского моря // Геоморфология и палеогеография. 2024. Т. 55. № 2. С. 138–153. DOI: 10.31857/S2949178924020075.
- Замотина З.С., Старовойтов А.В., Токарев М.Ю. и др. Анализ систем палеодолин в юго-западной части Карского моря по сейсмическим данным // Геофизика. М.: Ред.-изд. центр ЕАГО; Тверь: Полипресс, 2024. № 2. С. 16–23.
- Зархидзе Д.В., Красножен А.С. Карта плиоцен-четвертичных образований: S-41 (зал. Русанова); S-42 (о. Белый). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта плиоцен-четвертичных образований. Третье поколение. Южно-Карская серия, масштаб 1:1 000 000, серия: Южно-Карская. М.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2022.
- Конторович В.А., Аюнова Д.В., Гусева С.М. и др. Сейсмогеологическая характеристика осадочных комплексов и нефтегазоносность Ямальной, Гыданской и Южно-Карской нефтегазоносных областей (Арктические регионы Западной Сибири, шельф Карского моря) // Геофизические технологии. 2018. № 4. С. 10–26. DOI: 10.18303/2619-1563-2018-4-3.
- Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9.
- Красножен А.С., Зархидзе Д.В., Руденко А.А. и др. Карта доплиоценовых образований: S-41 (зал. Русанова); S-42 (о. Белый). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Геологическая карта доплиоценовых образований. Третье поколение. Южно-Карская серия, масштаб 1:1 000 000, серия: Южно-Карская. М.: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2022.
- Ласточкин А.Н. Подводные долины северного шельфа Евразии // Известия Всесоюзного географического общества. 1977. Т. 109. № 5. С. 412–417.
- 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. 198 с.
- Миронюк С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А. и др. 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.
- Мусатов Е.Е. Палеодолины Баренцево-Карского шельфа // Геоморфология. 1998. № 2. С. 90–95.

- Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонов С.А. и др. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // Вестник газовой науки. 2017. Т. 31. № 3. С. 255–262.
- Розенбаум Г.Е., Шполянская Н.А. Позднекайнозойская история криолитозоны Арктики. М.: Научный мир, 2000. 104 с.
- Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С. и др. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С. 38–41.
- Романовский Н.Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 1972. № 1. С. 23–34.
- Сорохтин Н.О., Никифоров С.Л., Ананьев Р.А. и др. Геодинамика Арктического шельфа России и рельефообразующие процессы в Центрально-Карском бассейне // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 625–635. DOI: 10.31857/S0030157422040116.
- Ступакова А.В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий // Геология нефти и газа. 2011. № 6. С. 99–115.
- Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Васильчук Ю.К. и др. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. 219 с.
- Хуторской М.Д., Ахметзянов В.Р., Ермаков А.В. и др. Геотермия арктических морей / под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС, 2013. 232 с.
- Шельфовые осадочные бассейны Российской Арктики: геология, геоэкология, минерально-сырьевой потенциал / под ред. Г.С. Казанина. Мурманск; СПб.: Реноме, 2020. 544 с.
- Baranov B.V., Dozorova K.A., Moroz E.A. et al. Contourites in the Seas of Russia, *Oceanology* 64 (Suppl. 1), 2024, S155–S169, DOI: 10.1134/S0001437024700966.
- Dallimore S.R., Lapham L.L., Côté M.M. et al. Source, migration pathways, and atmospheric release of geologic methane associated with the complex permafrost regimes of the outer Mackenzie River Delta, Northwest Territories, Canada, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129, e2023JF007515, DOI: 10.1029/2023JF007515.
- Grob H., Riedel M., Duchesne M. et al. Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2023, 24, e2023GC010884, DOI: 10.1029/2023GC010884.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringensparr C. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0, *Sci Data*, 2020, 7:176, 14 p., DOI: 10.1038/s41597-020-0520-9.
- 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. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(12), e2119105119, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Paull C.K., Hong J.K., Caress D.W. et al. Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: By-products of ongoing groundwater freezing and thawing in the sub-surface, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, vol. 129, e2024JF007719, DOI: 10.1029/2024JF007719.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. 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.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2019, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. 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.
- Электронный источник  
Ворошилов Е.В., Мороз Е.А., Соколов С.Ю. и др. Опасные геологические процессы в позднеплейстоценовых долинах Карского моря // Морские технологии 2021. Тезисы конференции. Геленджик, Россия, 26–30 апреля 2021 г. URL: [http://atlantic.ginras.ru/download/papers/Voroshilov\\_etal\\_2021\\_MarTech.pdf](http://atlantic.ginras.ru/download/papers/Voroshilov_etal_2021_MarTech.pdf) (дата обращения 28.10.2025).

Поступила в редакцию 23.04.2025

После доработки 24.08.2025

Принята к публикации 17.10.2025



## SEABED FLUID FLOW CASES IN PALEOVALLEYS OF THE KARA SEA SHELF

E.A. Moroz<sup>1</sup>, E.A. Eremenko<sup>2</sup>, A.P. Denisova<sup>3</sup>, D.S. Kulikova<sup>4</sup>, A.V. Kokhan<sup>5</sup>, R.A. Ananiev<sup>6</sup>,  
S.V. Maznev<sup>7</sup>, A.D. Mutovkin<sup>8</sup>

<sup>1-5</sup> Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Geomorphology and Tectonics of the Ocean Floor

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography

<sup>6,8</sup> Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Seismostratigraphy Laboratory

<sup>7</sup> Institute of Geography and Water Security, Republic of Kazakhstan

<sup>1</sup> Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: morozzea@gmail.com

<sup>2</sup> Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com

<sup>3</sup> Junior Scientific Researcher; e-mail: anden6900@gmail.com

<sup>4</sup> Junior Scientific Researcher; e-mail: daryakulikova@list.ru

<sup>5</sup> Junior Scientific Researcher; Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: kkkkk1987@mail.ru

<sup>6</sup> Scientific Researcher; e-mail: corer@mail.ru

<sup>7</sup> Senior Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: symaznev@gmail.com

<sup>8</sup> Leading Engineer; e-mail: admutovkin@mail.ru

Expeditionary research during 52 and 56 cruises of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov” in 2021–2023, was aimed at surveying a part of the Kara Sea water area northwest of the Bely Island. Based on seismoacoustic data, signs of degassing were identified in the relief, sedimentary cover and water column at several sites covering fragments of relict fluvial forms, i. e. paleovalleys. Three sites with different mesorelief and structure of the upper part of the loose sediment section were studied, covering fragments of paleovalleys at depths from 40 to 250 m. It was established that there are special degassing conditions in the paleovalleys of the southwestern part of the Kara Sea shelf, which are predetermined by the relief and geocryological structure of the bottom. Vertical migration of fluids from deep horizons leads to their accumulation at the bottom surface, where their uneven unloading occurs, depending on the combination of geomorphologic and geocryological conditions. Permafrost layer, which are a powerful fluid seal, are developed fragmentarily in the valleys. The concentration of gas shows increases in areas of their wedging out. Based on seismoacoustic and bathymetric data, pockmarks, pingo-like forms, dome-shaped uplifts, and mud volcanic formations were identified resulting from the fluidogenic discharge. The spectrum of fluidogenic forms developed in paleovalleys is determined by the morphology of the relief and their depth: pockmarks and mud volcanic structures are more typical for valley bottoms, where frozen rocks are distributed fragmentarily or are completely absent. Pingo-like forms (PLF) are found on the slopes of valleys where the thickness and cohesion of permafrost decreases. Mud diapir-dome-shaped uplifts are developed in the areas with almost complete absence of permafrost. Outside the valleys, gas shows and fluidogenic forms are isolated, which is associated with the presence of a fluid seal in the form of a permafrost layer. The results of the study allowed to establish that paleovalleys are the main fluid discharge zones on the shelf of the Kara Sea, and the permafrost degradation, including under the influence of fluid migration, determines the modern microrelief and dynamics of the processes. The data obtained are consistent with studies in other Arctic regions (the Beaufort Sea shelf, the Mackenzie River delta), thus confirming the universality of the mechanisms of interaction between permafrost and fluid flow within the shelf zone of the Arctic.

**Keywords:** permafrost, seismoacoustics, pingo-like forms, pockmarks

**Acknowledgements.** The authors express their sincere gratitude to the scientific teams of the 52nd and 56th cruises of the R/V “Akademik Nikolaj Strakhov” (2021 and 2023) for their invaluable support in data collecting and analyzing. The research was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-77-10091).

## REFERENCES

- Baranov B.V., Ambrosimov A.K., Moroz E.A. et al. Pozdnechetvertichnye konturitovye driftы na shelfe Karskogo moray [Late Quaternary contourite drifts on the Kara Sea shelf], *Doklady Ross Akad. Nauk, Nauki o Zemle*, 2023, vol. 511, no. 2, p. 236–242. (In Russian)
- Baranov B.V., Dozorova K.A., Moroz E.A. et al. Contourites in the Seas of Russia, *Oceanology* 64 (Suppl. 1), 2024, S155–S169, DOI: 10.1134/S0001437024700966.
- Bogdanov N.A. Tektonika Arkticheskogo okeana [Tectonics of the Arctic Ocean], *Geotektonika*, 2004, no. 3, p. 13–30. (In Russian)
- Bondarev V.N., Dlugach A.G., Kostin D.A. et al. Akusticheskie fatsii postkriogennykh obstanovok melkovodnykh rayonov Pechorskogo i Karskogo morey [Acoustic facies of post-cryogenic environments in shallow areas of the Pechora and Kara Seas], *Razvedka i okhrana nedr*, 1999, no. 7–8, p. 10–14. (In Russian)
- Dallimore S.R., Lapham L.L., Cote M.M. et al. Source, migration pathways, and atmospheric release of geologic methane associated with the complex permafrost regimes of the outer Mackenzie River Delta, Northwest Territories, Canada, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129, e2023JF007515, DOI: 10.1029/2023JF007515.
- Danilov I.D. Submarinnaya merzlota arkticheskogo shel’fa i svyazannye s ney protsessy kriogennogo litomorfogenez

- eza [Submarine permafrost on the Arctic shelf and related processes of the cryogenic morpholithogenesis], *Oceanology*, 2000, vol. 40, no. 5, p. 756–764. (In Russian)
- Danilov I.D., Buldovich S.N., Lukovkin D.S. Model dinamiki teploobmena v porodakh Karskogo shelfa i paleoshelfa v pozdnem pleystotsene-golotsene i submarinnyy kriolitogenez [Model of heat exchange dynamics in rocks of the Kara Sea shelf and paleo-shelf during the Late Pleistocene-Holocene and submarine cryolithogenesis], [Pleistocene-Holocene and submarine cryolithogenesis], *Kriosfera Zemli*, 1999, vol. III, no. 4, p. 54–60. (In Russian)
- Eremenko E.A., Kokhan A.V., Moroz E.A. et al. Usloviya, mekhanizm i stadii razvitiya pingopodobnykh form na shelfe Pechorskogo morya [Pingo-like features in the Pechora Sea: conditions, origin and stages of development], *Geomorfologiya i paleogeografiya*, 2024, vol. 55, no. 2, p. 138–153, DOI: 10.31857/S2949178924020075 (In Russian)
- Galushkin Yu.I. Variatsii klimata v istorii formirovaniya Yuzhno-Karskogo basseyna [Climate variations in the history of the South Kara Basin], *Zhizn' Zemli*, 2023, vol. 45, no. 4, p. 490–504, DOI: 10.29003/m3531.0514-7468.2019\_45\_4/490-504 (In Russian)
- Gavrilov A.V., Pavlov V.A., Fridenberg A.I. et al. Geokriologicheskoe kartografirovaniye shelfa Karskogo morya. Metodika i rezul'taty [Geocryological mapping of the Kara Sea shelf: Methodology and results], *Neftyanoe khozyaystvo*, 2019, no. 11, p. 28–32, ISSN 0028-2448. (In Russian)
- Grob H., Riedel M., Duchesne M. et al. Revealing the extent of submarine permafrost and gas hydrates in the Canadian Arctic Beaufort Sea using seismic reflection indicators, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2023, 24, e2023GC010884, DOI: 10.1029/2023GC010884.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringsenparr C. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0, *Scientific Data*, 2020, 7, 176, DOI: 10.1038/s41597-020-0520-9.
- Khutorskoy M.D., Akhmetzyanov V.R., Ermakov A.V. et al. *Geotermya arkticheskikh morey* [Geothermal studies of Arctic seas], Yu.G. Leonov (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2013. (In Russian)
- Kokhan A.V., Moroz E.A., Eremenko E.A. et al. Flyuidogenyy rebeif rayonov rasprostraneniya mnogoletney mertzloty na shelfe Pechorskogo i Karskogo morey [Fluidogenic landforms within the permafrost zone on the shelf of the Pechora and Kara Sea], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, p. 104–124. (In Russian)
- Kontorovich V.A., Ayunova D.V., Guseva S.M. et al. Seismogeologicheskaya kharakteristika osadochnykh kompleksov i neftegazonosnost Yamal'skoy, Gydanskoy i Yuzhno-Karskoy neftegazonosnykh oblastey [Seismogeological characteristics of sedimentary complexes and petroleum potential of the Yamal, Gydan, and South Kara oil and gas regions], *Geofizicheskie tekhnologii*, 2018, no. 4, p. 10–26. (In Russian)
- Krasnozhen A.S., Zarkhidze D.V., Rudenko A.A. et al. [Map of Pre-Pliocene formations: S-41 (Rusanov Bay); S-42 (Bely Island)], *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Tret'e pokolenie, Yuzhno-Karskaya seriya, mashtab: 1:1 000 000*, State Geological Map of the Russian Federation, Third Generation. South Kara Series, Scale 1:1 000 000, FGBNU VSEGEI Publ., 2022. (In Russian)
- Lastochkin A.N. [Morphology and genesis of submarine valleys of the northern Eurasian shelf], *Vozrast i genezis pereuglubleniy na shelfakh i istoriya rechnykh dolin* [Age and genesis of the overdeepenings on shelves and the history of river valleys], 1984, p. 22–28. (In Russian)
- Lastochkin A.N. Podvodnye doliny severnogo shelfa Evrazii [Submarine valleys of the northern Eurasian shelf], *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1977, vol. 109, no. 5, p. 412–417. (In Russian)
- Melnikov V.P., Spesivtsev V.I. *Inzhenerno-geologicheskie i geokriologicheskie usloviya shelfa Barentseva i Karskogo morey* [Engineering-geological and geocryological conditions of the Barents and Kara Sea shelves], Novosibirsk, Nauka Publ., 1995. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A. et al. [Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure], *Geologiya morei i okeanov, Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii* [Geology of seas and oceans: Proceedings of the 23rd international scientific conference on the marine geology], Moscow, IO RAN Publ., 2019, iss. 5, p. 192–196. (In Russian)
- Musatov E.E. Paleodoliny Barntsevo-Karskogo shelfa [Paleovalleys of the Barents-Kara Shelf], *Geomorfologiya*, 1998, no. 2, p. 90–95. (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. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(12), e2119105119, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Paull C.K., Hong J.K., Caress D.W. et al. Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: By-products of ongoing groundwater freezing and thawing in the sub-surface, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, vol. 129, e2024JF007719, DOI: 10.1029/2024JF007719.
- Perlova E.V., Miklyaeva E.S., Leonov S.A. et al. Gazovyye gidraty poluoostrova Yamal i privileyushego shelfa Karskogo morya kak oslozhnyayushchiy faktor osvoeniya regiona [Gas hydrates of the Yamal Peninsula and adjacent Kara Sea shelf as a complicating factor in regional development], *Vestnik gazovoy nauki*, 2017, vol. 31, no. 3, p. 255–262. (In Russian)
- 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.
- Rokos S.I., Dlugach A.G., Loktev A.S. et al. Mnogoletnemerzlye porody shelfa Pechorskogo i Karskogo morey: genezis, sostav, usloviya rasprostraneniya i zaleganiya [Permafrost on the Pechora and Kara Sea shelves: genesis, composition, distribution and occurrence conditions], *Inzhenernye izyskaniya*, 2009, no. 10, p. 38–41. (In Russian)
- Romanovsky N.N. Taliki v oblasti mnogoletnemerzlykh porod i skhema ikh podrazdeleniya [Taliks in permafrost regions and their classification], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 1972, no. 1, p. 23–34. (In Russian)

- Rozenbaum G.E., Shpolyanskaya N.A. *Pozdnekaynozoysskaya istoriya kriolitozony Arktiki* [Late Cenozoic history of the Arctic cryolithozone], Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2000. (In Russian)
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2019, no. 4, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. 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.
- Shel'fovye osadochnye basseyny Rossiyskoy Arktiki: geologiya, geoekologiya, mineral'no-syr'evoy potentsial* [Shelf Sedimentary Basins of the Russian Arctic: Geology, Geoecology, and Mineral Resource Potential], G.S. Kazanin (ed.), Murmansk, St. Petersburg, Renome Publ., 2020, 544 p. (In Russian)
- Sorokhtin N.O., Nikiforov S.L., Ananyev R.A. et al. Geodynamics of the Russian Arctic shelf and relief-forming processes in the Central Kara Basin, *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 4, p. 625–635, DOI: 10.31857/S0030157422040116.
- Stupakova A.V. Struktura i neftegazonosnost' Barentsevo-Karskogo shel'fa i privileyushchikh territoriy [Structure and petroleum potential of the Barents-Kara shelf and adjacent territories], *Geologiya nefti i gaza*, 2011, no. 6, p. 99–115. (In Russian)
- Trofimov V.T., Badu Yu.B., Vasilchuk Yu.K. et al. *Geokriologicheskoe rayonirovanie Zapadno-Sibirskoy plity* [Geocryological zoning of the West Siberian plate], Moscow, Nauka Publ., 1987, 219 p. (In Russian)
- Verba M.L. Sovremennoe bilateral'noe rastyazhenie zemnoj kory v Barentsevo-Karskom regione i ego rol' pri ocenke perspektiv neftegazonosnosti [Modern bilateral expansion of the earth's crust in the Barents-Karabakh region and its role in assessing the prospects of oil and gas content], *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2007, no. 2, p. 1–37. (In Russian)
- Verzhbitsky V.E., Kosenkova N.N., Ananyev V.V. et al. Geologiya i uglevodorodnyy potentsial Karskogo morya [Geology and hydrocarbon potential of the Kara Sea], *Oil & Gas Journal*, 2012, vol. 110, no. 1, p. 48. (In Russian)
- Zamotina Z.S., Starovoitov A.V., Tokarev M.Yu. et al. Analiz sistem paleodolin yugo-zapadnoy chasti Karskogo morya po seismicheskim dannym [Analysis of paleovalleys in the southwestern Kara Sea using seismic data], *Geofizika*, Moscow, EAEG Publishing Center, 2024, no. 2, p. 16–23. (In Russian)
- Zarkhidze D.V., Krasnozhen A.S. [Map of Pliocene-Quaternary formations: S-41 (Rusanov Bay); S-42 (Bely Island)], *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Tret'e pokolenie. Yuzhno-Karskaya seriya, mashtab: 1:1 000 000* [State Geological Map of the Russian Federation, Third Generation, South Kara Series, Scale 1:1 000 000], FGBNU VSEGEI Publ., 2022. (In Russian)
- Electronic source*
- Voroshilov E.V., Moroz E.A., Sokolov S.Yu. et al. Opasnye geologicheskie processy v pozdnepleistocenovyykh dolinakh Karskogo morya [Geohazards in the Late Pleistocene valleys of the Kara Sea], *Morskie tekhnologii 2021* [Marine technologies], Tezisy konferentsii, Gelendzhik, Rossiya, 26–30 aprelya 2021 g., URL: [http://atlantic.ginras.ru/download/papers/Voroshilov\\_etal\\_2021\\_MarTech.pdf](http://atlantic.ginras.ru/download/papers/Voroshilov_etal_2021_MarTech.pdf) (accessed 28.10.2025). (In Russian)

Received 23.04.2025

Revised 24.08.2025

Accepted 17.10.2025