ОКЕАНОЛОГИЯ, 2026, том 66, № 4, с. 753–770

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

DOI: 10.7868/S3034597926040121 Оригинальная статья
УДК 551.46

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И МОРФОЛОГИЯ ФЛЮИДОГЕННОГО РЕЛЬЕФА В МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

А. В. Кохан[1, *], Е. А. Еременко[1, 2], Е. А. Мороз[1], А. П. Денисова[1], Е. А. Сухих[1], Р. А. Ананьев[3], С. Ю. Соколов[1], С. Л. Никифоров[3]

[1] Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация
[2] Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[3] Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Российская Федерация
** E-mail: kkkkk1987@mail.ru*

Аннотация. По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования в Печорском море в 2020–2023 гг. установлены закономерности распространения флюидогенных форм на дне, связанные с фоновым рельефом, который был образован в позднем плейстоцене под действием субаэральных процессов. На участках, где многолетнемерзлые породы имеют массивное строение или высокую сплоченность, как правило, дегазация имеет рассеянный характер, и флюидогенные формы не выражены или выражены крайне слабо. Наибольшая плотность флюидогенных форм отмечается в депрессиях, где многолетнемерзлые породы имеют островное строение или низкую сплоченность. На участках мелководья (менее 35 м) флюидогенные формы не распространены, так как мерзлота выступает здесь в роли мощного флюидоупора. В процессе постепенного затопления территории в конце позднего плейстоцена и начале голоцена развитие флюидогенного рельефа происходило при участии течений (на ранних порах – в том числе, волновых и приливно-отливных). Ареалы флюидогенных форм на дне приводят к появлению латеральной дифференциации скоростей течений, возникновению локальных зон размыва и аккумуляции, появлению специфического микрорельефа (впадин, уступов, канальных дрифтов).

Ключевые слова: дегазация, пингоподобные формы, покмарки, голоценовая трансгрессия, субаквальная мерзлота

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22–77–10091 “Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения”.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. АВК – обработка данных, написание рукописи, оформление рукописи; ЕАЕ – редактирование рукописи; ЕАМ – руководство исследованием; АПД, ЕАС, РАА, СЮС, СЛН – сбор и обработка данных.

Ссылка для цитирования: Кохан А. В., Еременко Е. А., Мороз Е. А., Денисова А. П., Сухих Е. А., Ананьев Р. А., Соколов С. Ю., Никифоров С. Л. Закономерности распространения и морфология флюидогенного рельефа в мелководной части Печорского моря. *Океанология / Oceanology*. 2026. Т. 66. № 4. С. 753–770. https://www.doi.org/10.7868/S3034597926040121

© Кохан А. В., Еременко Е. А., Мороз Е. А., Денисова А. П., Сухих Е. А., Ананьев Р. А., Соколов С. Ю., Никифоров С. Л., 2026

OCEANOLOGY, 2026, vol. 66, No. 4, pp. 753–770

DOI: 10.7868/S3034597926040121 Original Article

Distribution and Morphology of Fluidogenic Landforms in the Shallow Part of the Pechora Sea

A. V. Kokhan[a, *], E. A. Eremenko[a, b], E. A. Moroz[a], A. P. Denisova[a], E. A. Sukhikh[a], R. A. Ananiev[c], S. Yu. Sokolov[a], S. L. Nikiforov[c]

[a] *Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Russian Federation*

[c] *Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Russian Federation*

** E-mail: kkkkk1987@mail.ru*

Abstract. The results of multibeam echo sounding and high-frequency seismic profiling in the Pechora Sea in 2020–2023 have established regularities in the distribution of fluidogenic landforms on the bottom associated with the background topography, which was formed in the Late Pleistocene under the influence of subaerial processes. In areas where submarine permafrost is massive or high areal coverage, seabed fluid flow is usually diffuse and fluidogenic forms are not expressed or are extremely weakly expressed. The highest density of fluidogenic landforms is observed in depressions where permafrost has fragmentary structure or low areal coverage. Fluidogenic landforms are not widespread in shallow water areas (less than 35 m), as permafrost acts here as a powerful fluid barrier. In the process of gradual flooding of the territory at the end of the Late Pleistocene and the beginning of the Holocene, the development of fluidogenic landforms took place with the participation of currents (in the early stages, including wave and tidal currents). Areals of fluidogenic landforms on the bottom lead to the appearance of lateral differentiation of current velocities, appearance of local erosion and accumulation zones, appearance of specific microrelief (depressions, scarps, channel drifts).

Keywords: degassing, pingo-like features, pockmarks, Holocene transgression, subaquatic permafrost

Funding. This research was carried out within the framework of RSF project № 22-77-10091 “Patterns of degassing on the Barents-Kara shelf and its effect on relief and bottom sediments”.

Conflicts of interest. The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions. AVK – data processing, manuscript writing and design; EAE – manuscript editing; EAM – research leadership; APD, EAS, RAA, SYuS, SLN – fieldworks for collection of data and field and onshore data processing.

For citation: Kokhan A. V., Eremenko E. A., Moroz E. A., Denisova A. P., Sukhikh E. A., Ananiev R. A., Sokolov S.Yu., Nikiforov S. L. Distribution and morphology of fluidogenic landforms in the shallow part of the Pechora Sea. *Okeanologiya / Oceanology*. 2026. V. 66. No. 4. P. 753–770.
https://www.doi.org/10.7868/S3034597926040121

© Kokhan A. V., Eremenko E. A., Moroz E. A., Denisova A. P., Sukhikh E. A., Ananiev R. A., Sokolov S.Yu., Nikiforov S. L., 2026

ВВЕДЕНИЕ

Флюидогенный рельеф образуется на дне в результате дегазации – процесса поднятия флюидов из недр Земли вверх по осадочному разрезу к поверхности дна и в водную толщу. На арктических шельфах флюидогенные формы представлены покмарками (“pockmarks”), пингоподобными формами (ППФ, “pingo-like features”), газовыми куполами и др. [10, 15, 30, 34]. В последние десятилетия установлено, что распространение флюидогенных форм и сопутствующих газопроявлений определяется сложным сочетаниям ряда факторов, среди которых ведущими являются распространение и мощность толщ субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП) [10, 31, 34], внутри- и подмерзлотных газогидратов [24, 36], близость разломных зон и нефтегазоносных структур [20, 33].

Одним из наиболее детально изученных ареалов флюидогенного рельефа в Российской Арктике является дно Печорского моря, где геокриологическая и литологическая неоднородность верхней части осадочного чехла, а также наличие потенциальных источников поступления флюидов стали причинами широкого морфологического разнообразия форм, созданных дегазацией. Именно здесь впервые в российском арктическом секторе были обнаружены и детально исследованы ППФ, а также другие флюидогенные формы [3, 6, 9, 16]. Установлено, что формирование флюидогенного рельефа происходило на глубинах от 30–40 до 70–90 м в субаквальных условиях в результате выдавливания пластичномерзлых толщ к поверхности дна при участии грязевулканических процессов [6, 9]. На относительно мелководных участках дегазации препятствует высокая сплоченность и мощность ММП, флюидогенные формы обнаруживаются редко и изучены локально. В то же время, именно на мелководье флюидогенный морфолитогенез протекает совместно с другими современными геоморфологическими процессами (ледовыми, деятельностью придонных, волновых и приливно-отливных течений) и, вероятно, может как испытывать их воздействие, так и, в свою очередь, влиять на их развитие.

Целью исследования являлось выявление закономерностей распространения флюидогенных форм на дне мелководной (до 50 м) части Печорского моря; факторов, их определяющих, а также характера взаимодействия субаквальных геоморфологических процессов на участках развития дегазации. Обследованный участок дна расположен в 5 км к северо-западу (рис. 1) от полигона “Диапиры”, изученного в ходе работ АМИГЭ в 1988 и 1995 гг. [3], и в 2018 и 2020 гг. [6, 9]. По опубликованным сведениям, ранее геофизические работы на обследованном полигоне не выполнялись.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа основывается на батиметрических и сейсмоакустических данных, полученных в 49-м (2020 г.) и 56-м (2023 г.) рейсах НИС “Академик Николай Страхов” и в 51-м рейсе (2022 г.) НИС “Академик Борис Петров”. Для выполнения геофизических работ применялись многолучевые эхолоты SeaBat 8111 и T-50 ER, высокочастотные акустические профилографы EdgeTech 3300, Parasound P70 и P35, сенсоры движения и гирокомпас, объединенные в приборах Applanix POS-MV, датчики скорости звука SVP-70. Разрешающая способность составила 0.1–1 м, глубина проникновения акустического сигнала – 10–100 м, точность определения местоположения 0.5–2.0 м в режиме DGPS. Съемка выполнялась по сетке галсов с межгалсовым расстоянием от 180–200 до 300–350 м и одновременной работой многолучевого эхолота и высокочастотного профилографа.

На камеральном этапе обработка данных многолучевого эхолотирования проведена в программном пакете PDS2000 с построением цифровых моделей рельефа дна разрешением 2x2 м и 10x10 м. С использованием цифровых моделей рельефа дна были определены параметры ППФ и проведен морфометрический анализ (по методике, описанной в работе [5]). Расчет статистических показателей и построение графиков проводились в MS Excel. Обработка данных высокочастотного профилирования 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 3.34. Для расчета глубины залегания отражающих горизонтов на разрезах акустического профилографа применялась скорость звука в осадках 1600 м/с.

Геолого-геоморфологическое строение и изученность района работ

В тектоническом отношении полигон работ располагается в границах Русановской складчато-надвиговой зоны, расположенной между Вашуткино-Талотинским надвигом и Вайгачско-Южноновоземельским антиклинорием.

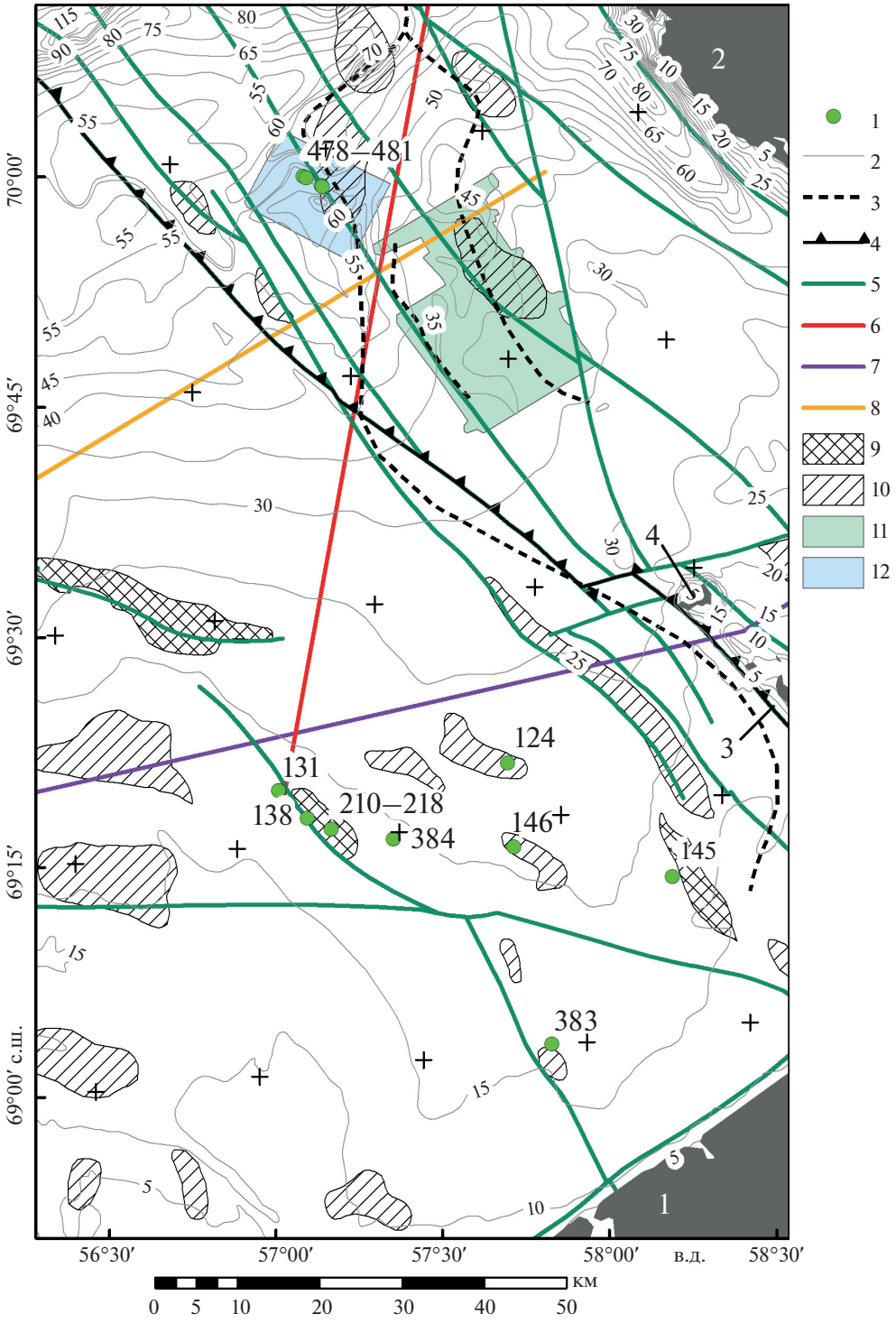


Рис. 1. Местоположение изученного полигона (цифрами обозначены: 1 – Варандейский берег, 2 – о. Вайгач, 3 – о. Долгий, 4 – о. Матвеев). Условные обозначения: *1* – местоположение и номера скважин, упомянутых в тексте, *2* – изобаты по [11], *3* – тальвеги ложбинообразных понижений дна, *4* – Вашуткино-Талотинский надвиг, *5* – разломы по данным ГГК [7], *6* – местоположение сейсмоакустического профиля по данным [27], *7* – местоположение профиля электроразведки по данным [12], *8* – глубинный сейсмический разрез МОВ ОГТ (см. рис. 7), *9* – нефтегазовые месторождения [7], *10* – перспективные нефтегазоносные структуры [7], *11* – полигон работ, *12* – полигон “Диапиры” [3, 6, 9]

Fig. 1. Location of polygon of studies (shown with numbers: 1 – Varandey coast, 2 – Vaigach i., 3 – Dolgiy i., 4 – Matveev i.). Designations: *1* – locations and numbers of boreholes mentioned in the text, *2* – isobaths after [11], *3* – talwegs of hollow-like depressions of the bottom, *4* – Vashutlkino-Tolotinsky thrust, *5* – faults after GGK data [7], *6* – location of seismic-acoustic profile after [27], *7* – location of electric sounding profile after [12], *8* – deep seismic profile MRW CDP (see fig. 7), *9* – oil-and-gas fields [7], *10* – perspective oil-and-gas bearing structures [7], *11* – polygon of works, *12* – “Diapiri” polygon [3, 6, 9]

Осадочный чехол здесь состоит из серии смятых в складки тектонических пластин и разбит взбросо-надвигами, соединяющимися на глубинах 8–10 км со сместителем Вашуткино-Талотинского надвига, полого погружающимся в северо-восточном направлении. Три таких разлома северо-западного простирания проходят на изученном полигоне [7] (рис. 1). В отложениях триасовой системы установлен ряд нефтегазоперспективных структур, неподтвержденных бурением, в т.ч структура "Моржовая" [7]. Стратиграфия осадочного разреза дна характеризуется хорошей изученностью. Вблизи полигона проходит сейсмоакустический профиль [27], привязанный к скважинам, пробуренным к юго-западу от района работ (рис. 1). Мощность четвертичных осадков составляет от 40–45 м (скважины 124 и 146) до 110 м (скважины 210–218). Они представлены морскими образованиями голоцена, сартанскими и каргинскими аллювиально-морскими отложениями и ермаковскими диамиктонами [27]. По данным сейсмопрофилирования установлено, что мощность голоценовых отложений в районе работ составляет менее 5–10 м [8], сартанских и каргинских отложений – до 100–120 м. Ниже залегают предположительно ермаковские диамиктоны оценочной мощностью до 30–40 м и казанцевские аллювиально-морские осадки неустановленной мощности [27]. Общая мощность четвертичных осадков оценивается в диапазоне от 75–100 м [8] до 140–170 м [27]. Дочетвертичные породы представлены в центральной и западной частях полигона глинами и алевролитами меловой и юрской систем общей мощностью 500–650 м. Они подстилаются аргиллитами, алевролитами и песчаниками триасовой системы общей мощностью до 3.5–4 км, обладающими высокими коллекторскими свойствами [7]. В восточной части полигона породы триасовой системы залегают непосредственно под четвертичными образованиями.

В строении осадочного чехла присутствуют ММП, что оказывает влияние на возможность свободного просачивания флюидов из недр к поверхности дна. Так, к югу от полигона ММП были вскрыты скважинами при глубинах моря от 15.5 до 28 м. Вскрытая мощность ММП с прослоями криопэгов составила от первых метров до 30–47 м (подошва не установлена) [14]. На полигоне "Диапиры" ММП были вскрыты бурением (скважины 478–481, рис. 1) на глубинах от первых метров (в пределах флюидогенных форм) до 20–25 м (вне последних). В скв. 481 на глубине 49 м под толщей ММП была вскрыта зона аномально высокого пластового давления (АВПД), заполненная песчано-газо-водяной смесью, что привело к выбросу последней [3]. По результатам измерения температур пород в скважинах до глубины порядка 10 м грунты обладают положительной температурой (в летний период), в интервале 10–23 м – пребывают в охлажденном состоянии, с глубины 23 м – в мерзлом состоянии с температурой около −1.5 °C [14]. По данным геоэлектрического профилирования [12] установлено, что к югу от полигона на глубинах менее 50 м мощность талого слоя достигает 50–70 м, мощность ММП – 330–350 м. Характерно массивно-островное распространение ММП с длиной отдельных островов вдоль профиля 10–50 км и зон, интерпретируемых как талики, – 1–7 км. Тепловой поток в районе работ составляет 50–60 мВт/м^2 [23]. По данным моделирования при таких величинах теплового потока и глубинах моря 50 м прогнозируемые мощности ММП составляют порядка 120–130 м [12].

Одним из потенциальных источников флюидов, поступление которых в верхнюю часть разреза и к поверхности приводит к образованию специфического микрорельефа на дне Печорского моря, являются залежи газогидратов. По данным моделирования [28], кровля зоны стабильности газогидратов в Печорском море располагается на глубинах 140–170 м ниже поверхности дна, ее мощность достигает 300–500 м. Таким образом, в осадочной толще развиты внутри- и подмерзлотные газогидраты, приповерхностная зона стабильности газогидратов в районе работ отсутствует [2].

В сартанское время (18–23 тыс.л.н., МИС 2) южная граница ледниковых покровов реконструируется севернее района работ. Изучаемая территория в то время представляла собой аллювиально-озерную равнину. Позднее, по мере голоценовой трансгрессии шло отступание дельты и долин рек бассейна Печоры на юго-запад [17]. В настоящее время рельеф дна представляет собой холмисто-западинную поздненеоплейстоцен-голоценовую аккумулятивно-абразионную равнину [1]. На глубинах 100–105 м, 60 м, 50–54 м, 40 м, 32 м и 25 м выявлены древние береговые линии. Рельеф наиболее мелководной части абразионно-аккумулятивной равнины (с глубинами менее 35–40 м) имеет голоценовый возраст [18].

В течение голоцена рельеф дна развивался под действием комплекса природных процессов, среди которых ведущими являются морская терригенная аккумуляция, деятельность придонных течений, ледовая экзарация и волновое воздействие (на небольших глубинах), а также

флюидогенный морфолитогенез. На современном этапе максимальная глубина килей ледовых образований в Печорском море составляет не более 16 м [13], что ограничивает возможность их воздействия на донный рельеф. Волновое воздействие простирается до глубин порядка 35–38 м исходя из максимальной расчетной длины волны 0.1% обеспеченности в 77 м [21], его основные объемы сосредоточены в диапазоне глубин 10–30 м, на бóльших глубинах изменения поверхности дна в ходе 3-суточного шторма обеспеченности 1 раз в год не превышают –0.1...+0.1 м по данным расчетов [22]. Для района работ характерно наличие непериодических северных и север-северо-восточных течений со скоростями до 10–15 см/с [35]. Они проходят вдоль береговой линии с запада (Беломорская ветвь) и с юго-востока от Печорской губы (Печорская ветвь) и несут относительно теплые воды во все сезоны года. Приливо-отливные течения в районе работ характеризуются скоростями до 30–40 см/с и субмеридиональным распространением [4]. Температура донных осадков составляет в изучаемом районе +3...+5 °С [25], а средние температуры придонных вод на глубинах 30–50 м опускаются в наиболее холодный период (январь–март) до –0.2...–0.8 °С, в теплый период (июль–сентябрь) составляют +0.2...+1.5 °С [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рельеф дна

Обследованный полигон (26 × 15 км) площадью около 358 км^2 располагается в 45 км к северо-западу от о. Матвеев. Глубины изменяются от 26 м (на вершинных поверхностях ППФ в южной части полигона) до 54 м в северной части (рис. 2А). В центральной части полигона протягивается субмеридиональная ложбина с глубинами от 42–35 до 52 м, возрастающими в северном направлении. Вдоль западного края полигона был частично закартирован северо-восточный борт схожей по морфологии ложбины. Ее тальвег, судя по транзитным съемочным профилям, располагается в 4–8 км западнее и протягивается по направлению к юго-восточному сектору полигона “Диапиры” [9].

Среди форм микрорельефа, осложняющих общую выровненную поверхность дна, доминируют флювиальные (созданные течениями) и флюидогенные. Среди последних преобладают ППФ, которых обнаружено 246 шт. Высота ППФ составляет от менее метра до 16–18 м, площадь основания от 700–800 до 28 тыс. м^2 (рис. 3 А), длина – 31–288 м, ширина – 28–186 м (рис. 3В). Высоты ППФ распределены достаточно равномерно: на каждый из диапазонов высот в промежутке от 0 до 12 м приходится от 13% до 16% форм (рис. 3Б). Крутизна склонов ППФ изменяется от 4–6° до 26–30° (рис. 3Г). Преобладают формы с куполообразной формой поперечного профиля (181 из 246), 36 форм обладают конусовидной формой, у 29 форм отмечается плоская вершинная поверхность. Обнаружено восемь форм с кратерами и рвообразными понижениями на вершинах. На склонах некоторых ППФ на глубинах 32–40 м отмечены террасовидные поверхности шириной 15–25 м. Эти псевдотеррасы, предположительно, оползневого происхождения, не оконтуривают ППФ, а приурочены только к их западным и юго-западным склонам. Характерно преобладание северной (у 29% ППФ) и южной (у 27% ППФ) экспозиции наиболее крутых склонов ППФ. При этом длинные оси 64% ППФ имеют субширотную ориентировку (рис. 3Д).

Выделено три типа ППФ, различающихся по морфологии (рис. 4). Для первого типа характерны высота до 4–6 м, плановые размеры менее 80–100 м, относительно небольшая крутизна склонов (до 10–15°, локально до 20–25°). Для второго типа характерны высота до 12–18 м, плановые размеры до 150–300 м, крутизна склонов до 25–30°. Эти формы могут быть дополнительно разделены на два подтипа. Подтип 2а характеризуется наличием оползневых псевдотеррас на склонах крутизной до 15–25°, куполовидными или практически плоскими вершинами, зачастую осложненными рвообразными или кратерообразными понижениями. Для ППФ подтипа 2б характерны ровные крутые склоны крутизной до 40–45° и конусовидные вершинные поверхности. К третьему типу форм отнесены массивные постройки, состоящие из нескольких слившихся воедино ППФ, возвышающихся на едином цоколе. Такие постройки имеют длину до 1.5–2 км при ширине до 150–250 м.

На обследованном полигоне ППФ приурочены к пологим склонам и днищу ложбинообразного понижения и образуют группы (кластеры) (рис. 2А). Кластер № 1 включает наиболее крупные формы, преобладают ППФ второго типа (с равным соотношением подтипов 2а и 2б), а также встречены массивные постройки третьего типа. К северо-востоку от него располагается кластер № 2, где встречены исключительно ППФ первого типа высотой до 5 м. Севернее кластера № 1 располагаются кластеры № 3 (преобладают ППФ подтипа 2а) и кластер № 4 (преоблада-

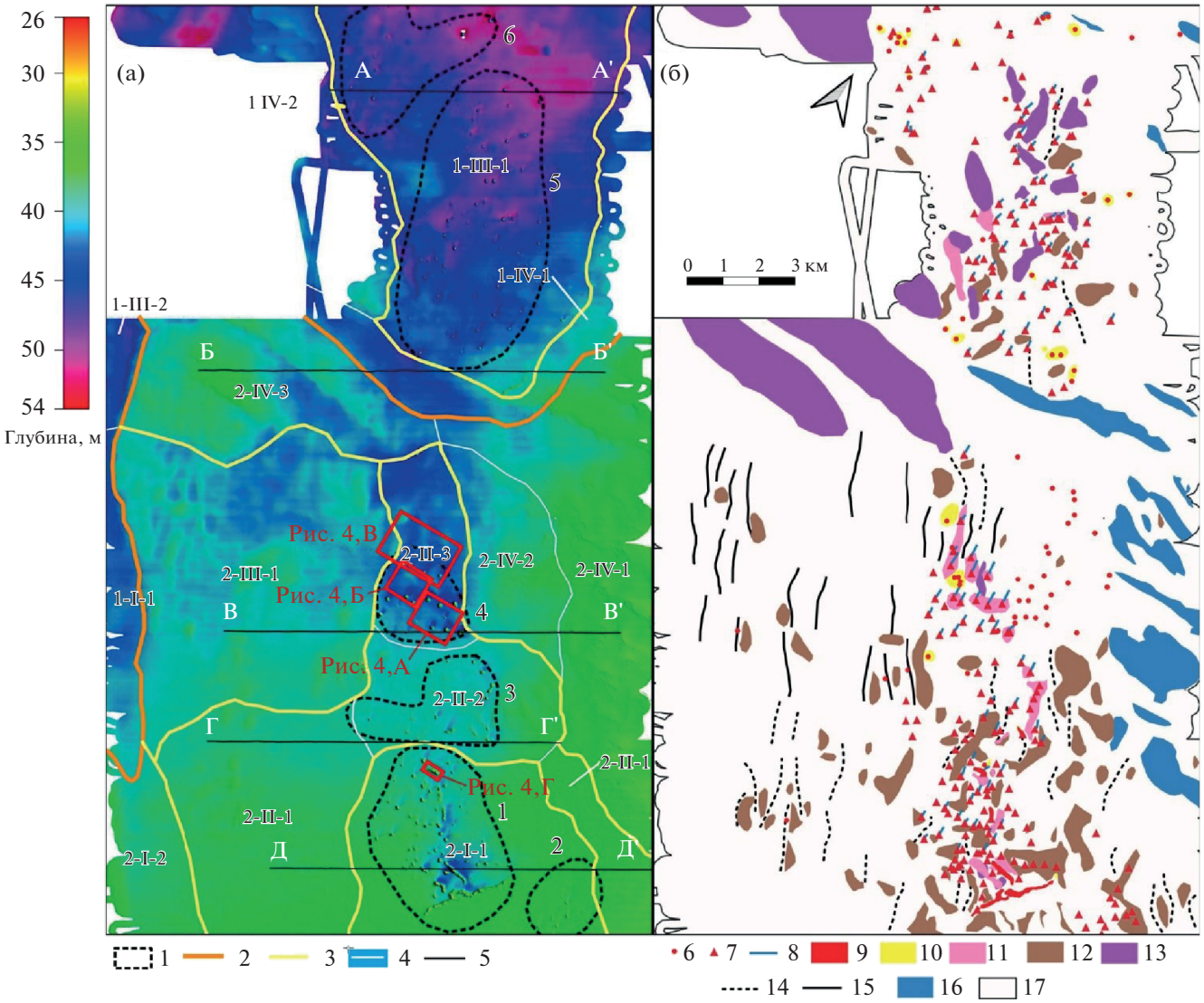


Рис. 2. А – Цифровая модель рельефа дна полигона, Б – геоморфологическая схема. Условные обозначения: *1* – кластеры ППФ (номера подписаны цифрами), *2* – границы геоморфологических районов, *3* – границы геоморфологических подрайонов, *4* – границы геоморфологических областей, *5* – линии разрезов показанных на рис. 5, *6* – участки развития покмарок, *7* – ППФ, *8* – оси эрозионных впадин близ ППФ, *9* – массивы ППФ, *10* – куполовидные поднятия, *11* – впадины, заполненные отложениями ССК1, выраженные в рельефе дна, *12* – то же, не выраженные в рельефе дна, *13* – гряды, созданные течениями, *14* – оси поднятий кровли ССК2, не выраженные в рельефе дна, *15* – то же, выраженные в рельефе дна, *16* – скопления уступов и впадин, созданных течениями на мелководье, *17* – границы покрытия полигона батиметрической съемкой

Fig. 2. A – Digital terrain model of polygon sea bottom, B – geomorphological scheme. Designations: *1* – clusters of PLF (numbers of clusters are shown), *2* – boundaries of geomorphological areas, *3* – boundaries of geomorphological subareas, *4* – boundaries of geomorphological regions, 5 – lines of sections shown on fig. *5, 6* – sites of pockmarks development, *7* – PLF, *8* – axes of erosional depressions near PLF, *9* – massifs of PLF, *10* – dome-like rises, *11* – depressions filled with SSC1 sediments, reflected in the bottom topography, *12* – the same, not reflected in the bottom topography, *13* – ridges formed by currents, *14* – axes of rises of SSC2, not reflected in bottom topography, *15* – the same, reflected in the bottom topography, *16* – areas of presence of steps and depression formed by currents at the shallow parts of the polygon, *17* – boundaries of coverage of polygon by bathymetric survey

ют ППФ подтипа 2б), где ППФ выстраиваются в три линейных скопления, ориентированных по азимуту 60–70°. В северной части полигона выделены кластеры № 5 и № 6, для которых характерно относительно равномерное сочетание ППФ первого и второго типов, расположенных хаотично.

По соседству с ППФ нередко встречаются слабовыраженные в рельефе куполовидные поднятия удлиненной или изометричной формы (рис. 4Б, В, З). Всего отмечено 28 таких форм. Их высота не превышает 2 м, ширина изменяется от 100–150 до 300–500 м, длина достигает 300–700 м, крутизна склонов – первые градусы.

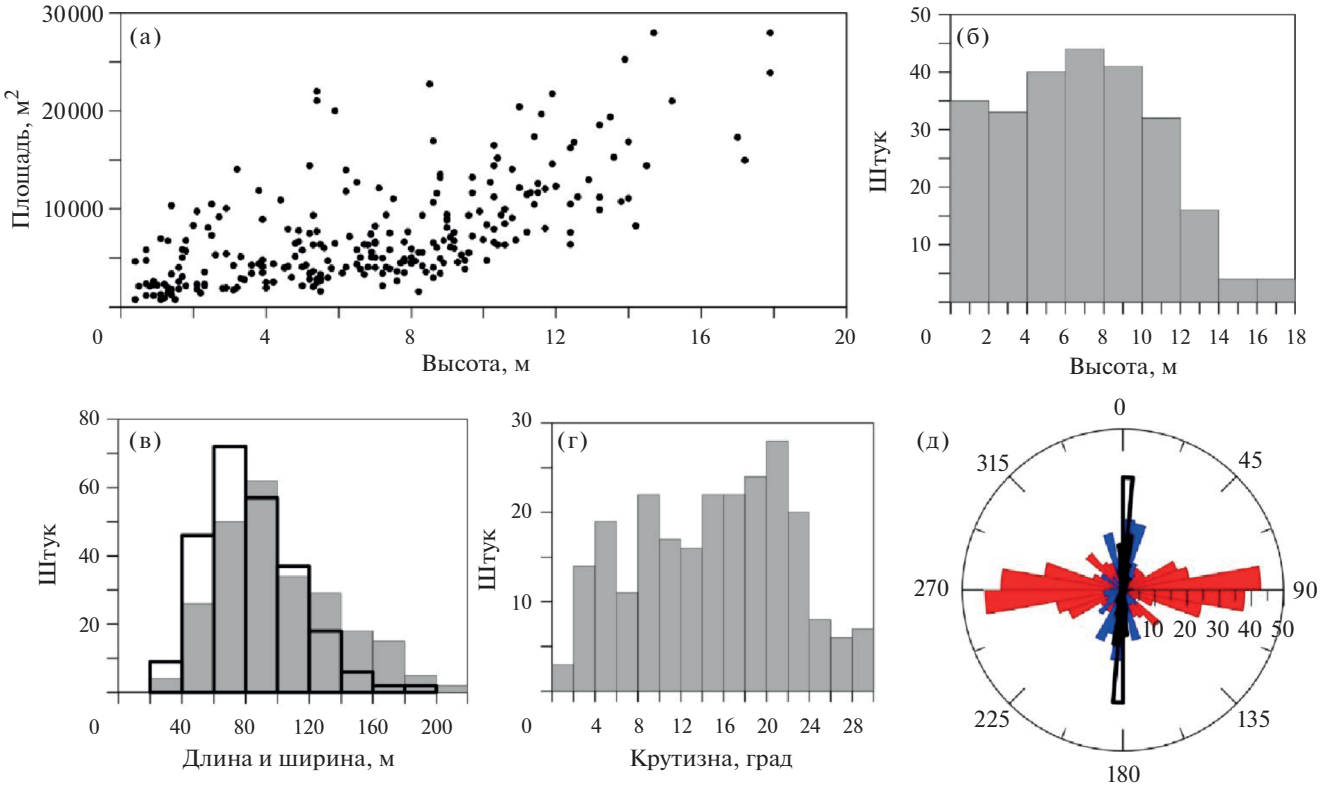


Рис. 3. Морфометрические показатели ППФ: соотношение площади и высоты (А), гистограммы распределения высоты (Б), длины (показана с заливкой) и ширины (показана без заливки) (В), крутизны (Г), распределение ориентировок (Д): красным – длинных осей ППФ, синим – участков с максимальной крутизной склонов ППФ, черным – длинных осей эрозионно-аккумулятивных впадин

Fig. 3. Morphometric values of PLF: area-height ratio (A), histograms of height (B), length (shown with solid grey) and width (shown with hollow graphic) (C), slopes steepness (D), distribution of orientations (E): shown with red – of long axes of PLF, shown with blue – of areas of slopes with maximum steepness, shown with black – of long axes of erosional-accumulative depressions

На вершинных поверхностях поднятий наблюдаются рвообразные или воронкообразные впадины глубиной до 0.2–0.3 м, в отдельных случаях – мельчайшие ППФ высотой не более 0.8 м. В 32 случаях из 74 скопления рвообразных или воронкообразных впадин отмечаются на практически выровненной поверхности морского дна (рис. 4Б), где относительные превышения не превышают 0.3–0.5 м. Четыре ареала таких форм приурочены к впадинам вблизи ППФ, по-видимому, образованным в результате течениевого размыва.

В рельефе обследованного участка дна хорошо выражены формы флювиального (течениевого) происхождения. Так, в северо-западной части полигона располагаются гряды субширотного простирания высотой до 3–4 м и шириной до 1.5–2 км с асимметричным поперечным профилем (рис. 2). Южные склоны гряд более крутые (2–3°) в сравнении с северными (менее 0.3°), осложнены фестончатыми в плане уступами. Гряды разделены впадинами шириной до 1 км. В северной части полигона похожие, но крайне слабо выраженные в рельефе гряды имеют высоту до 1–2 м и ширину до 1.5–2 км. Относительно мелководные участки близ восточной границы полигона также осложнены течениевыми формами, которые представляют собой уступы и соседствующие с ними впадины субширотного простирания. Высота уступов не превышает 1–2 м, крутизна – 2–3°. Глубина впадин составляет 0.5–1 м, ширина до 30–40 м, длина – до 100–150 м. Крутизна бортов впадин достигает 5–6°. Описанные элементы и формы образуют фестончатые в плане скопления, их формирование под действием течений, развитых в рассматриваемой части акватории, подтверждают морфология и ориентировка.

Более мелкие формы, созданные под действием течений, выражены непосредственно рядом с ППФ. В частности, к северу и северо-востоку от наиболее крупных ППФ отмечено 96 удлиненных впадин (рис. 4А, Б, В). Их длина составляет от 50–70 до 300–500 м, относительная глубина – до 2–4 м. Впадины имеют субмеридиональную ориентировку. На их восточных бортах нередко наблюдаются серии уступов высотой до 1–2 м, крутизной до 5–6° и длиной от 30–50 до 100–130 м.

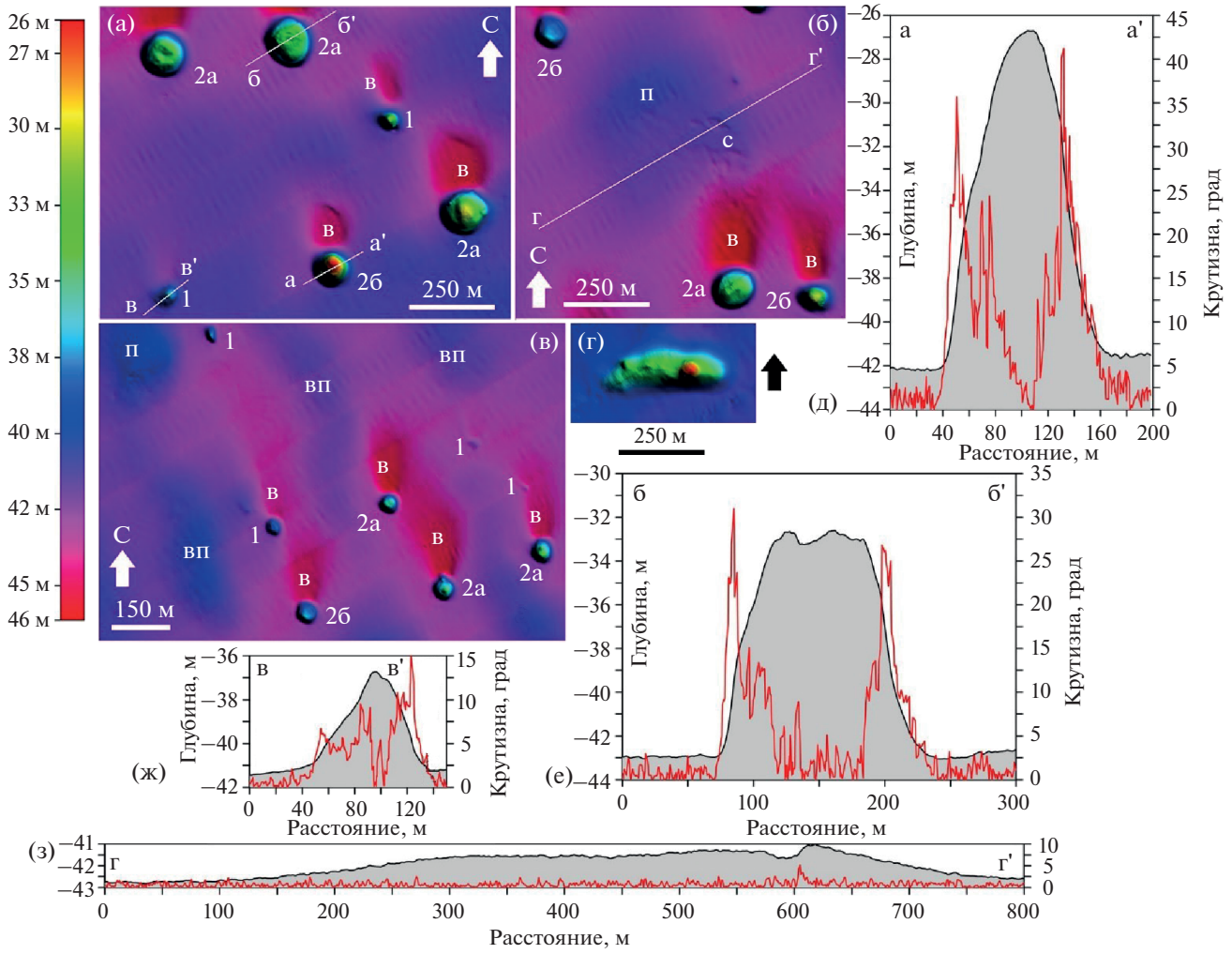


Рис. 4. Морфология ППФ на цифровой модели рельефа (разрешение 2х2 м). Цифрами на рисунках обозначены: 1, 2а, 2б – типы ППФ, в – эрозионные впадины, вп – валообразные поднятия, п – куполовидные поднятия, с – скопление покмарок, а – эрозионно-аккумулятивная форма сложенная осадками ССК1. Д, Е, Ж, З – батиметрические профили вдоль линий, показанных на А, Б и В (красным цветом показан график изменения крутизны поверхности). Положение фрагментов ЦМР показано на рис. 2, А

Fig. 4. Morphology of PLF on the digital terrain model (resolution 2x2 m). Shown with numbers: 1, 2a, 2b – PLF types, dp – erosional depressions, rr – rampart-like rises, d – dome-like rises, p – pockmarks clustersl, a – erosional-accumulative rise formed by deposits of SSC1. D, E, F, G – bathymetric profiles along lines shown on A, B and C (graphic of surface steepness is shown with red). Locations of DTM fragments are shown on fig. 2, A

Также на участках, где ППФ расположены близко друг к другу в днище субмеридиональной ложбины, наблюдается серия микроформ, напоминающих канальные дрифты. Они имеют высоту до 3–5 м и ширину 300–500 м (рисунки 2, 5Д). Вероятно, ареалы ППФ выступают своеобразными препятствиями для распространения течений, и на участках падения их скорости протекает аккумуляция.

Строение верхней части осадочного чехла

По результатам высокочастотного акустического профилирования в строении дна выявлены три сейсмостратиграфических комплекса (ССК) (рис. 5), согласующиеся со схемой сейсмостратиграфии района работ [3].

С поверхности дна на обследованном полигоне на большей его части залегают отложения **ССК1**, ассоциируемые с морскими позднеплейстоцен-голоценовыми илами, глинами и суглинками (mIIIsr-H). Видимая мощность отложений варьирует от менее 1 м до 26 м (рисунки 5Д, 6А), максимальная мощность отмечена в южной части полигона. В рельефе подошвы ССК1 выражены впадины и поднятия с перепадом отметок от 5 до 15–20 м и размерами от 150–250 до 300–500 м по ширине и от 300–500 м до 1.5–2 км по длине. В юго-западной части полигона данные

валообразные поднятия выражены в рельефе дна. В северном направлении выраженность поднятий и впадин в рельефе дна постепенно уменьшается из-за их перекрытия осадками ССК1 (рисунки 5В, Г; 6А). Юго-восточная часть полигона занята крупной впадиной, где мощность отложений ССК1 достигает 20–26 м. В центральной части полигона отложения ССК1 обладают минимальной мощностью (1–5 м) (рисунки 5Б, 6А) и слагают формы, созданные течениями. В частности, формы субширотной ориентировки, напоминающие песчаные волны, сложены отложениями ССК1 мощностью до 4 м. Толща осадков ССК1 местами характеризуется газонасыщенностью, что маскирует ее подошву. Такие участки газонасыщения приурочены преимущественно к ложбине вдоль западной границы полигона и впадинам с максимальными мощностями осадков ССК1 в южной его части. На юге полигона они формируют 16 участков сплошного газонасыщения осадков (рис. 6А, Б) общей площадью порядка 4.2 км^2.

Ниже ССК1 залегает акустически слоистый **ССК2**, ассоциируемый с морскими и аллювиальными поздненеоплейстоценовыми (сартанскими) песками и суглинками (a, mIIIsr). Осадки ССК2 отличаются высокой газонасыщенностью, их акустическая слоистость прослеживается фрагментарно. Подошва отложений ССК2 не трассируется на разрезах акустического профилографа. Мощность отложений ССК2 может достигать 25–35 м [3].

Осадки ССК2 подстилаются акустически непрозрачной толщей **ССК3**, ассоциируемой с поздненеоплейстоценовыми глинами, суглинками, супесями и пылеватыми песками с включениями

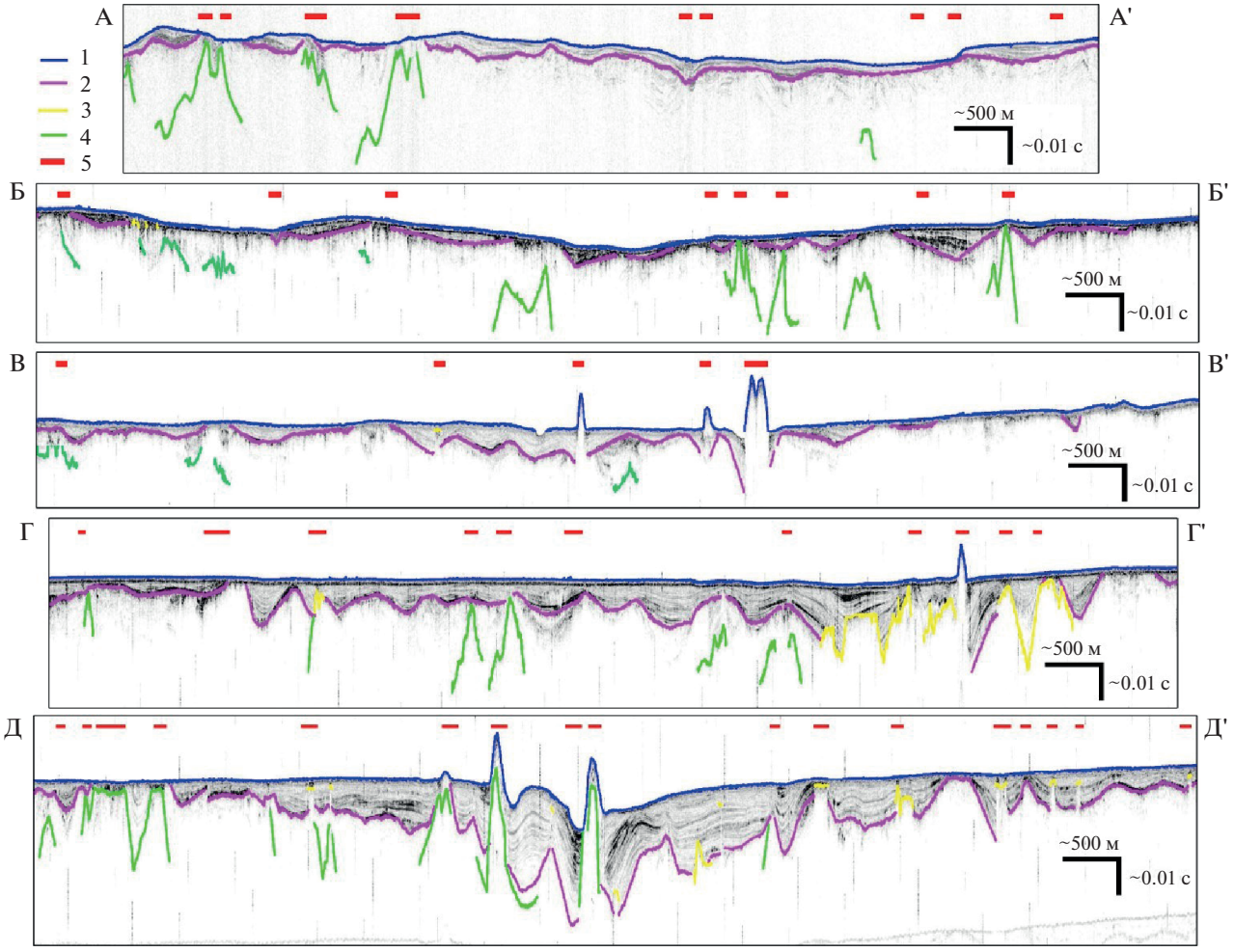


Рис. 5. Сейсмоакустические разрезы, построенные по данным высокочастотного профилирования. Условные обозначения: *1* – дно, *2* – подошва ССК1/кровля ССК2, *3* – кровля газонасыщенных осадков, *4* – кровля ССК3, *5* – участки пересечения газопроявлений в водной толще. Положение разрезов показано на рис. 2А

Fig. 5. Seismoacoustic profiles, based on the high-frequency profiling data. Designations: *1* – bottom, *2* – bottom of SSC1/top of SSC2, *3* – top of gas-saturated sediments, *4* – top of SSC3, *5* – areas of crossing of gas flares in the water column. Location of profiles is shown on fig. 2, A

льдистых и флюидонасыщенных грунтов. В стратиграфическом отношении их верхняя часть относится к сартанским отложениям (mIIIsr), а нижняя – к морским каргинским и казанцевским осадкам (mIIIkr+kz). Кровля ССК3 представляет собой сложно построенную систему отражений различной геометрии и имеет сложный рельеф, секущий стратиграфические границы. Непосредственно в пределах ППФ ССК3 выходит на поверхность дна либо перекрывается крайне маломощным (менее 1–2 м) покровом отложений ССК1, представленных илами (по данным опробования грунтовой трубкой и дночерпателем). Местами в пределах ППФ отложения ССК3 наслаиваются или вклиниваются в толщу отложений ССК1, аналогично характеру залегания, описанному на полигоне "Диапиры" [6]. Кровля ССК3 трассируется на полигоне фрагментарно в виде отдельных массивов (рис. 6Б). Южный массив (обозначен цифрой "1" на рис 6Б) отличается наибольшей расчлененностью и максимальной глубиной залегания кровли ССК3 (5–29 м ниже дна). Кровля отличается чередованием впадин и валообразных поднятий длиной 300–700 м преимущественно северо-западного простирания. Для западного массива (обозначен цифрой "2" на рис 6Б, плановые размеры – 13 × 3 км) характерно относительно сплоченное строение кровли ССК3, которая залегает на глубинах 5–20 м и имеет выровненный рельеф. Центральный массив (обозначен цифрой "3" на рис 6Б) характеризуется сочетанием локальных участков с глубинами кровли ССК3 2–7 м и впадин с глубинами кровли ССК3 до 20 м ниже уровня дна. Северный массив (обозначен цифрой "4" на рис. 6Б) демонстрирует строение промежуточное между южным и западным. Для него характерно сочетание относительно выровненного рельефа кровли ССК3

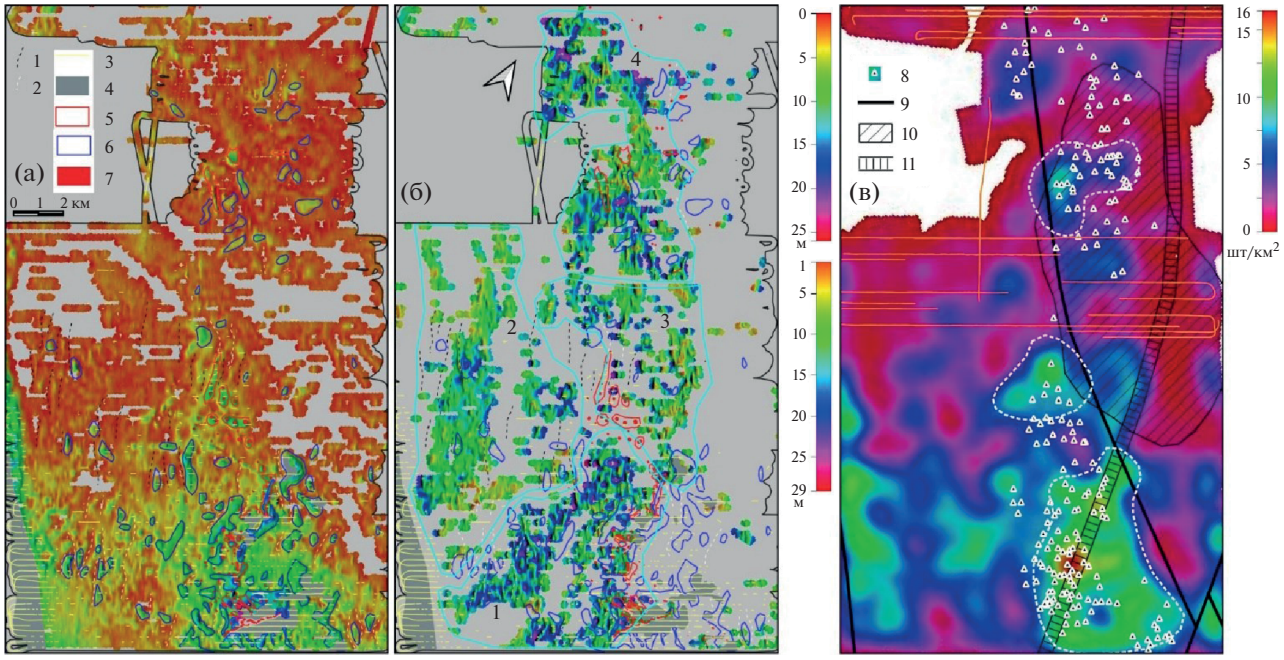


Рис. 6. Закономерности строения разреза и зафиксированные газопроявления: А – рельеф подошвы ССК1, Б – рельеф кровли ССК3 (голубым контуром показаны массивы предполагаемых сильнольдистых и газонасыщенных грунтов различной степени деградации), В – газопроявления в водной толще. Условные обозначения: *1* – оси поднятий, сложенных осадками ССК2, выраженные в рельефе дна, *2* – то же, невыраженных в рельефе дна, *3* – участки распространения газонасыщенных осадков на разрезах акустического профилирования, *4* – зоны сплошного газонасыщения осадочного чехла, *5* – впадины, заполненные ССК1 и выраженные в рельефе дна, *6* – то же, не выраженные в рельефе дна, *7* – ППФ; на врезке В: *8* – ППФ, *9* – разломы по [7], *10* – контуры нефтегазоносной структуры "Моржовая" по [7], *11* – граница выклинивания меловых и юрских отложений по [7]. На врезке В оранжевыми линиями показаны галсы низкого качества в виду плохих погодных условий, на них не выполнялось дешифрирование газопроявлений, белые пунктирные линии оконтуривают кластеры газопроявлений, упоминаемые в тексте

Fig. 6. Patterns of section structure and detected gas flares. A – topography of SSC1 bottom, B – topography of SSC3 top (massifs of supposed gas-saturated soils and soils with high ice content of various degree of degradation), C – gas flares in the water column. Designations: *1* – axes of rises comprised by SSC2 deposits, reflected in the bottom topography, *2* – the same, not reflected in the bottom topography, *3* – areas of development of gas-saturated sediments on the acoustic profiling sections, *4* – zones of continuous gas-saturation of deposits, *5* – depressions, filled with SSC1 deposits and reflected in the bottom topography, *6* – the same, not reflected in the bottom topography, *7* – PLF, also shown on C, *8* – PLF, *9* – faults after [7], *10* – boundaries of oil-and-gas bearing structure "Morzhovaya" after [7], *11* – boundaries of wedging out of Cretaceous and Jurassic deposits after [7]

в центре и участков с ярко выраженным валообразным рельефом кровли ССК3 на периферии.

Газопроявления в водной толще

На полигоне установлено 1569 газопроявлений в водной толще, представленных вертикальными акустическими аномалиями типа “факел” (рис. 6В). Общая протяженность пройденных на полигоне съемочных профилей составила 1779.9 км, на 155.2 км из них пересечены газопроявления. В среднем длина газопроявлений составила около 100 м (максимально – 743 м), бóльшая их часть зафиксирована в пределах ложбинообразного понижения дна. Плотность газопроявлений на площади полигона изменяется от 1–2 до 15–16 шт./км^2. Газопроявления группируются в три кластера – наименее выраженный северный (порядка 60–70 шт., до 8–10 шт./км^2), центральный (порядка 150 шт., до 10–12 шт./км^2) и южный (порядка 350 шт., до 15–16 шт./км^2). Съемочными профилями пересечено 125 из 246 ППФ, над 81.6% из них зафиксированы газопроявления. Встречаясь как над ППФ, так и над ровным дном, куполообразными и валообразными поднятиями, газопроявления формируют локальные скопления по площади полигона и зону сплошного развития в ложбине вдоль его западной границы. Корреляции между плотностью газопроявлений, границей выклинивания юрских-меловых отложений под толщей четвертичных пород и контурами нефтегазоперспективной структуры Моржовая (рис. 6В) не прослеживается. Северный и южный кластеры совпадают с зонами максимального развития ППФ и примыкают к разломной зоне (рис. 6В).

Геолого-геоморфологическое районирование полигона

Анализируя закономерности распространения флюидогенного рельефа на обследованном полигоне, а также характер изменения строения верхней части осадочного чехла, можно заметить латеральную изменчивость, связанную, прежде всего, с мезорельефом дна. Для дальнейшей реконструкции последовательности и обстановок формирования флюидогенных форм и комплексов, было выполнено геолого-геоморфологическое районирование полигона. На первом уровне по присущим чертам строения мезорельефа дна выделены районы. На следующем уровне в зависимости от типа строения разреза внутри районов выделены подрайоны, а внутри последних – области, различающиеся генезисом и морфологией присущего микрорельефа дна, прежде всего, флювиального (созданного течениями) и флюидогенного.

Территория обследованного полигона может быть разделена на два района (рис. 2А). Первый район характеризуется относительной глубоководностью (глубины более 35–40 м) и позднеплейстоценовым возрастом фонового рельефа дна. Он занимает северную и крайнюю западную части полигона. Второй район характеризуется меньшими глубинами (до 35–40 м) и голоценовым возрастом фонового рельефа дна.

Далее внутри районов в зависимости от типа строения разреза (характерных мощностей ССК1, рельефа кровли ССК3 и характера зафиксированных газопроявлений) выделены подрайоны. Типы строения разреза обозначены римскими цифрами I, II, III, IV в номерах областей на рис. 2А.

Для *первого (I) типа строения разреза* характерны непрерывность и максимальная на полигоне мощность осадков ССК1 (средняя мощность 10–12 м, максимальная видимая – 29 м). Разрез на больших по площади участках полностью маскируется скоплениями газа. В рельефе подошвы ССК1 хорошо выражены многочисленные впадины глубиной до 15–20 м и размерами до 2х0.5 км. Ниже по разрезу на глубинах от 10–15 до 20–25 м отмечается кровля отложений ССК3, имеющих фрагментарно-островное распространение.

Для *второго (II) типа строения разреза* характерны непрерывность и меньшая мощность осадков ССК1 (в среднем – 5–10 м, максимальная – до 20 м). Разрез характеризуется существенно меньшей газонасыщенностью. В рельефе подошвы ССК1 хорошо выражены многочисленные впадины глубиной от 5–7 до 10–15 м и размерами до 1.5х0.7 км, погребенные валообразные поднятия длиной до 2 км и шириной до 0.3–0.4 км. Ниже по разрезу на глубинах от 8–10 до 20–27 м в виде относительно сплоченных массивов отмечается кровля ССК3 залегающая в виде системы поднятий и впадин с амплитудой до 10–15 м и шириной до 0.3–0.4 км.

Для *третьего (III) типа строения разреза* характерен преимущественно непрерывный покров осадков ССК1 небольшой мощности (до 3–5 м, во впадинах – до 10 м). Газонасыщенность верхней части осадочного чехла минимальна, подошва осадков ССК 1 преимущественно ровная. Ниже по разрезу на глубинах от 2–3 до 12–15 м залегает также ровная кровля ССК3. На небольших по площади изометричных участках дна (0.3–1 км) ССК1 отсутствует и на поверхности дна обнажаются осадки ССК2.

Для *четвертого (IV) типа строения разреза* характерен прерывистый покров осадков ССК1 мощностью не более 3–5 м. Рельеф подошвы ССК1 в основном выровненный, встречаются единичные впадины с мощностью отложений ССК1 до 5–7 м. На поверхности дна залегают в основном осадки ССК2. Кровля ССК3 обычно не прослеживается либо заметна в виде отдельных островных массивов.

Флювиальный и флюидогенный рельеф развит практически на всей площади полигона, но морфология форм и их плотность различны, что послужило основанием для разделения обозначенных подрайонов на области (рис. 2А). Прежде всего, выделяются области 2-I-2 и 1-I-1, приуроченные к крупной ложбине вдоль западной границы полигона, где установлено полное отсутствие флюидогенных форм, а преобладающим рельефообразующим процессом выступает морская аккумуляция.

В пределах областей 1-III-1, 2-I-1, 2-II-2 и 2-II-3 доминирующим типом микрорельефа являются ППФ. При этом в области 1-III-1 ППФ первого и второго типов распределены по площади дна равномерно, а в области 2-I-1 ППФ второго типа образуют два крупных скопления, а ППФ первого типа – еще одно небольшое скопление по соседству. В области 2-II-2 доминируют ППФ подтипа 2а, а в 2-II-3 – ППФ подтипа 2б. В областях 2-III-1, 2-II-1, несмотря на высокую распространенность газопроявлений в водной толще, газонасыщенность в разрезе выражена слабо, а флюидогенный рельеф представлен только валообразными поднятиями. В подрайонах с присущим четвертым (IV) типом строения разреза (области 1-IV-1, 2-IV-1, 2-IV-2, 2-IV-3), интенсивность флюидогенного рельефообразования минимальна, и доминирует микрорельеф, созданный течениями. Лишь в области 2-IV-2 на небольшой площади располагается крупное скопление покмарок, морфология которых изменена под воздействием течений. В частности, эти отрицательные формы часто вытянуты в плане, имеют рвообразные и воронкообразные очертания, т.е. морфологически несколько отличаются от классических покмарок [5].

Рельефообразующая деятельность течений проявляется на всем обследованном полигоне и приводит к образованию мезо- и микроформ, сложенных морскими голоценовыми осадками (ССК1) и описанных ранее. В то же время, заметно взаимное влияние флювиальных и флюидогенных процессов: в области развития ППФ формы, созданные течениями, относятся к ранг микрорельефа (впадины, канальные дрифты), в то время как на более мелководных участках, где ППФ не выражены, доминируют крупные гряды. Под влиянием течений изменяется, в свою очередь, и морфология ППФ: склоны, обращенные к течениям, являются более крутыми, а противоположные – более пологими, сложенными, в том числе, материалом, перемещаемым течениями. За счет размыва течениями на бортах ППФ активизируются оползневые процессы и возникают уступы. В ряде случаев на бортах удлиненных впадин близ ППФ наблюдаются резко выраженные уступы размыва, с которыми соседствуют покмарки и на разрезах профилографа отмечаются газопроявления. Вероятно, уступы формируются на бортах впадин, где возникает наиболее интенсивная турбулентность в потоке воды с последующим размывом верхнего слоя осадков, способствующим проникновению флюидов к поверхности и образованию покмарок.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время развитие рельефа дна изученного полигона протекает под действием течений и притока флюидов из недр. Эти процессы приводят к появлению мезо- и микрорельефа, осложняющего поверхность абразионно-аккумулятивной равнины позднеплейстоцен-голоценового возраста. Развитию флюидогенных процессов способствует геологическое строение полигона. На архивном разрезе МОВ ОГТ (рис. 7) в верхней части осадочного чехла четко прослеживаются два газоподводящих канала (1 на рис. 7) проходящих в толще юрских, меловых и четвертичных пород (2 на рис. 7). Ниже располагается обширная область потери сейсмической корреляции (3 на рис. 7), интерпретируемая как зона газонасыщения в толще горных пород триасовой системы (4 на рис. 7). В северо-восточной части зоны потери корреляции частично прослеживается замковая зона антиклинали (5 на рис. 7). Эта антиклиналь отчетливо отображается на современном глубинном разрезе, проходящем на расстоянии порядка 35 км к юго-востоку и представленном на рис. 2 в работе [19]. На разрезе отмечается соляной диапир в основании антиклинали и разломные нарушения, смещающие отложения на флангах антиклинали, данное образование интерпретируется как результат соляной тектоники. Антиклиналь выступают одним из элементов обширной зоны соляного диапиризма в полосе Вашуткино-Талотинского надвига, чьи элементы интерпретируются нами

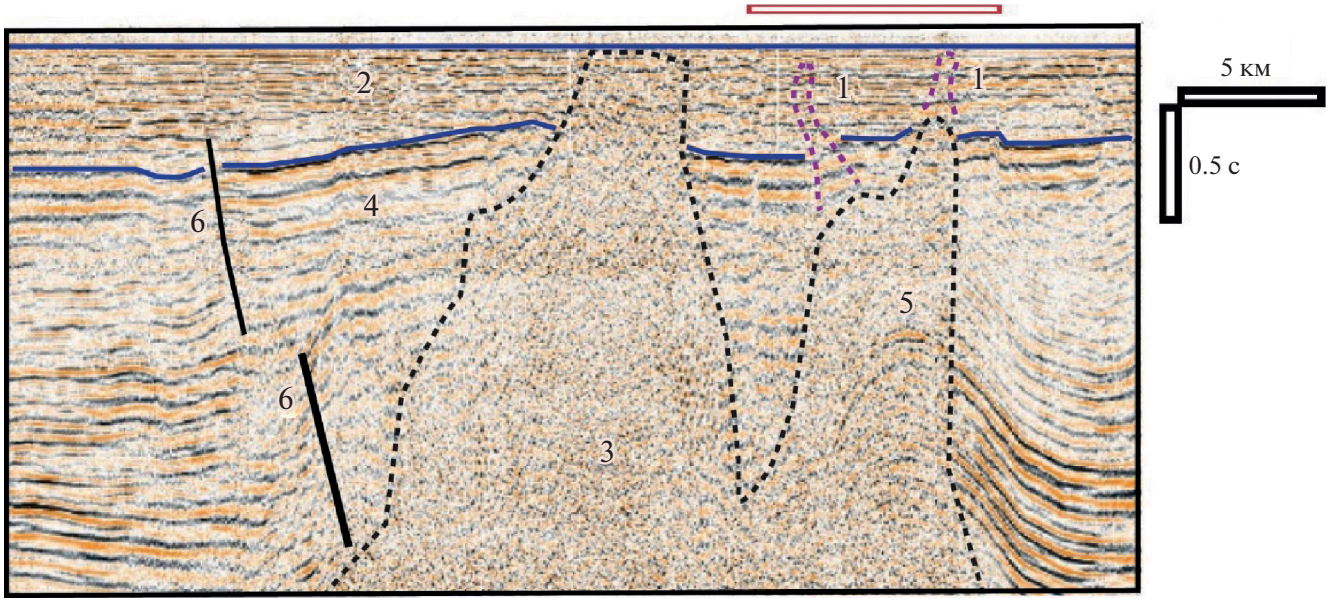


Рис. 7. Интерпретация фрагмента разреза МОВ ОГТ 078626 (положение разреза показано на рис. 1). Условные обозначения: *1* – газоподводящие каналы, *2* – осадки четвертичного, мелового и юрского возраста, *3* – зона потери корреляции, *4* – осадки триасового возраста и древнее, *5* – замковая зона антиклинали, *6* – Вашуткино-Талотинский надвиг. Красным прямоугольником показана зона пересечения полигона работ. Интерпретация разреза выполнена авторами

Fig. 7. Interpretation of fragment of MRW CDP section 078626 (location of the section is shown on fig. 1). Designations: *1* – gas chimneys, *2* – deposits of Quaternary, Cretaceous and Jurassic age, *3* – zone of correlation loss, *4* – deposits of Triassic age and older, *5* – anticline hinge zone, *6* – Vashutkino-Talotinsky thrust. The area of crossing on the polygon of works by the profile is shown with red quadrangle. Interpretation of the section is performed by authors

в западной части разреза (6 на рис. 7). Флюиды могут поступать из недр по Вашуткино-Талотинскому надвигу и оперяющим его разломам, со стороны нефтегазоперспективной структуры "Моржовая" и локальных ловушек в разрезе триасовых пород. Возможно и приповерхностное происхождение флюидов, связанное с деградацией ММП, под- и внутримерзлотных газогидратов. Повышенный тепловой поток в разломных зонах способствует формированию сквозных тектоногенных таликов, как например, в море Лаптевых [26], что наряду с относительно невысокой мощностью субаквальных ММП способствует миграции флюидов к поверхности. Источником водной составляющей флюидов могут выступать грунтовые воды, проникающие с близко расположенной суши из поддолинных таликов крупных рек вдоль подошвы субаквальных ММП, что отмечено в морях Лаптевых и Бофорта [26, 31].

Формированию ППФ предшествует появление валообразных поднятий и разделяющих их впадин, что установлено на полигоне "Диапиры" [6]. Под действием течений поднятия и впадины могут быть частично погребены осадками ССК1. На участках с высокой интенсивностью притока флюидов впадины могут достигать значительных размеров и соединяться между собой (к примеру, в пределах областей 2-I-1, 2-II-2, 2-II-3). Образования, напоминающие покмарки, развиты на полигоне ограниченно, при этом они встречаются не только на выровненном дне, но и на склонах валообразных и куполовидных поднятий.

Наличие флюидогенного рельефа на дне влияет на скорости течений, приводя к появлению локальных зон размыва и аккумуляции. Первые представлены впадинами к северу и север-северо-востоку от ППФ (рис. 4А, Б, В), а также крутыми уступами на склонах ППФ, там, где они омываются водами течений. Аккумуляция приводит к формированию микроформ типа канальных дрифтов между близко расположенными ППФ.

Явных признаков воздействия на флюидогенные формы волновых и ледовых процессов на полигоне не обнаружено. В то же время вершинные поверхности 9% ППФ располагаются в зоне воздействия волн максимальной расчетной длиной волны 0.1% обеспеченности (до глубин менее 35–38 м), поэтому участия волновых процессов в перемещении вещества полностью исключать не следует.

Полученные результаты позволяют реконструировать хронологию образования флюидогенных форм на дне и развитие взаимодействия флюидогенных и флювиальных процессов. В период сартанской регрессии (18–23 тыс.л.н.,

МИС 2) территория обследованного полигона представляла собой низменную сушу, сложенную аллювиально-морскими позднеплейстоценовыми осадками, с широким распространением ММП. С началом трансгрессии первой была затоплена наиболее сниженная, северная часть полигона, а также днище ложбины в его западной части. Формирование ППФ в области 1-III-1, по-видимому, началось в это время. Остальная часть полигона в это время представляла собой заозеренную низменность. На пониженных участках (в днище субмеридиональной ложбины) заозеренность была больше, встречались несквозные талики. На относительно более высоких участках заозеренность была ниже и сплоченность ММП больше.

По мере подъема уровня моря территория постепенно затапливалась, происходила постепенная деградация ММП и началось развитие флюидогенного морфолитогенеза. В южной части полигона формирование флюидогенного рельефа шло более активно, даже несмотря на более позднее затопление морскими водами. Возможно, в течение некоторого отрезка времени эта часть полигона (область 2-I-1) представляла собой мелководную лагуну, что способствовало лучшему прогреву воды, деградации ММП и усиленному развитию флюидогенных процессов. В результате здесь сформировалось крупное скопление ППФ, и плотность современных газопроявлений максимальная. Эта гипотеза хорошо соотносятся с закономерностями эволюции рельефа полигона, обследованного в море Лаптевых [32], где установлено наличие погребенных голоценовыми морскими осадками озерных понижений с таликовыми зонами. Именно в зонах наибольшей заозеренности в прошлом дегазация протекает особенно интенсивно в сравнении с соседними, более мелководными участками, где развиты сплоченные ММП.

Участок ложбины вдоль западной границы полигона до начала трансгрессии, по-видимому, представлял собой долину относительно крупного водотока, в пределах которой существовал сквозной талик. Впоследствии на этом участке флюидогенный рельеф не получил развития, так как в отсутствие флюидоупора (толщи ММП) дегазация имеет рассеянный характер как в разрезе, так и в водной толще.

С момента затопления водами Карского моря флюидогенный рельеф развивается в тесной связи с волновыми и флювиальными процессами на дне. Относительная мелководность на ранних стадиях трансгрессии могла являться причиной волновой переработки образующихся неровностей дна, и многие флюидогенные формы, возникшие в то время, могли быть частично или полностью уничтожены волнением и приливно-отливными течениями. Однако в настоящее время, когда лишь в наиболее сильные шторма потенциально возможно проникновение волновых колебаний до глубин, где располагаются вершинные поверхности ППФ, образуемые флюидогенные формы подвергаются лишь воздействию течений. В свою очередь, наличие ППФ оказывает влияние на латеральную дифференциацию скоростей течений, приводя к формированию зон размыва и аккумуляции осадков на дне.

Многочисленные газопроявления, зафиксированные в водной толще и осадочном чехле на участках развития флюидогенного рельефа, доказывают современную активность дегазации. На относительно небольшой глубине (до 35–40 м) этот процесс идет существенно менее интенсивно, чему препятствует бóльшая сплоченность толщи ММП. Таким образом, характер распространения современных проявлений дегазации в обследованной части Печорского моря обнаруживает тесную связь с рельефом и геокриологическим строением дна, сформированными в позднем плейстоцене. Как и в других областях Баренцево-Карского шельфа [9; 16] активность флюидогенного морфолитогенеза существенно выше в палеодепрессиях разного генезиса в сравнении с прилегающими ровными пространствами дна.

ВЫВОДЫ

Поступление флюидов в верхнюю часть осадочного чехла обследованного участка шельфа Печорского моря происходит со стороны Вашуткино-Талотинского надвига и оперяющих его разломов, нефтегазоперспективной структуры “Моржовая” и локальных ловушек в разрезе триасовых толщ, на что указывает наличие на сейсмическом разрезе газоподводящих каналов. В толще четвертичных отложений свободной миграции флюидов к поверхности дна препятствует наличие ММП.

Закономерности видимого распространения флюидогенных форм на дне связаны с фоновым рельефом, который был образован в позднем плейстоцене под действием субаэральных процессов (прежде всего, флювиальных и криогенных). Толща ММП, образованная в сартанское время, изначально характеризовалась латеральной неоднородностью строения, что впоследствии оказало

влияние на скорости ее деградации и проницаемость.

На участках, где ММП имеют массивное строение или высокую сплоченность, как правило, дегазация имеет рассеянный характер и флюидогенные формы не выражены или выражены крайне слабо. Наибольшая плотность флюидогенных форм отмечается в депрессиях, где ММП имеют островное строение или низкую сплоченность. На участках мелководья (менее 35 м) флюидогенные формы не распространены, так как ММП выступают здесь в роли мощного флюидоупора.

В процессе постепенного затопления территории в конце позднего плейстоцена и начале голоцена развитие флюидогенного рельефа происходило при участии течений (на раннем этапе – в том числе, волновых и приливно-отливных). Ареалы флюидогенных форм на дне приводят к появлению латеральной дифференциации скоростей течений, возникновению локальных зон размыва и аккумуляции, появлению специфического микрорельефа (впадин, уступов, канальных дрифтов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бирюков В.Ю., Огородов С.А.* Рельеф дна Печорского моря // Трудове на Института по океанология. 2003. Т. 4. С. 105–110.
2. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В., Янчевская А.С.* Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3 (31). С. 42–55. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-42-5
3. *Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А. и др.* Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под редакцией Ф.С. Терзиева и др. Л.. Гидрометеоиздат, 1990. 279 с.
5. *Денисова А.П., Еременко Е.А., Мороз Е.А. и др.* Морфология покмарок на шельфе Баренцева моря и определяющие ее факторы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2025. Т. 80. № 2. С. 99–115. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.80.2.8
6. *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. https://doi.org/10.31857/S2949178924020075
7. *Журавлев В.А., Кораго Е.А., Костин Д.А. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39,40 о. Колгуев прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2014. 405 с.
8. *Костин Д.А., Тарасов Г.А.* Четвертичный осадочный чехол Баренцево-Карского бассейна // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 3. М.: ГЕОС, 2011. С. 107–130.
9. *Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др.* Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9.
10. *Кохан А.В., Еременко Е.А., Мороз Е.А. и др.* Флюидогенный рельеф на шельфах морей Арктики // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2024. Т. 2. С. 91–107. https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8.
11. *Кошель С.М., Кошель А.С., Ушакова Л.А.* Картографирование рельефа дна северных морей России с использованием цифровых моделей // ИнтерКарто/ИнтерГИС-20: Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Материалы международной конференции. Белгород: Константа. 2014. С. 417–423.
12. *Кошурников А.В.* Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований). Дисс. д. г.-м. н. М., 2023. 394 с.
13. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.
14. *Мельников В.П., Спесивцев В.И.* Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма, 1995. 194 с.
15. *Миронюк С.Г.* Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование: материалы Всероссийской конференции с международным участием. М., 2020. С. 37–43.
16. *Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П. и др.* Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского желоба (Печорское море) // Докл.РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 5–11. DOI:10.31857/S2686739723600820
17. *Павлидис Ю.А., Богданов Ю.А., Левченко О.В. и др.* Новые данные о природной обстановке в Баренцевом море в конце валдайского ледниковья // Океанология. 2005. Т. 45. № 1. С. 92–106.
18. Печорское море. Системные исследования / Под ред. Е.А. Романкевича и др. М.: Море, 2003. 486 с.
19. *Соборнов К.О.* Нефтегазоносный потенциал зон дислоцированных соляных диапиров Тимано-Печорского бассейна // Минеральные Ресурсы России. Экономика и Управление. 2023. № 2 (181). С. 29–37.

20. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д. и др.* Проявления дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 91–96.
21. Справочные данные по режиму ветра и волнения шельфа Баренцева и Карского морей / Под ред. Л.И. Лопатухина, А.В. Бухановского, Е.С. Чернышовой. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. 334 с.
22. *Трубкин И.П., Немировская И.А.* Модельные расчеты динамики наносов в Печорском море // Геоморфология. 2022. Т. 53. № 4. С. 17–24.
23. *Цибуля Л.А., Соколова Л.С.* Тепловой поток Баренцевоморско-Карского региона // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 11. С. 1049–1052.
24. *Andreassen K. et al.* Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // Science. 2017. V. 356. P. 948–953. https://doi.org/0.1126/science.aal4500
25. *Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M. et al.* In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas // Marine and Petroleum Geology. 2023. P. 106467. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106467.
26. *Charkin A.N. et al.* Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea // The Cryosphere. 2017. V. 11 (5). P. 2305–2327. https://doi.org/10.5194/tc-11-2305-2017
27. *Gataullin V., Mangerud J., Svendsen J.-I.* The extent of the Late Weichselian ice sheet in the southeastern Barents Sea // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. P. 453–474.
28. *Malakhova V.V.* The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606-012035
29. *Locarnini R.A. et al.* World Ocean Atlas 2023, V. 1: Temperature. A. Mishonov Technical Editor. 2024. NOAA Atlas NESDIS 89. 52 p. https://doi.org/10.25923/54bh-1613
30. P*aull C.K., Ussler W.U., Dallimore S.R. et al.* Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geoph. Res. Lett. 2007. V. 34. L01603. https://doi.org/10.1029/2006GL027977
31. *Paull C.K. et al.* Massive ice outcrops and thermokarst along the Arctic shelf edge: by-products of ongoing groundwater freezing and thawing in the sub-surface // J. of Geophys. Res.: Earth Surface. 2024. V. 129. e2024JF007719. https://doi.org/10.1029/2024JF007719
32. *Rekant P. et al.* Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea // Arktos. 2015. V. 1. № 1. https://doi.org/10.1007/s41063-015-0011-y
33. *Semenov P., Mattingsdal R., Winsborrow M., Patton H., Andreassen K.,* Widespread natural methane and oil leakage from sub-marine Arctic reservoirs // Nat. Commun. 2023. V. 14. № 1782. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37514-9
34. *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 // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2015. V. 120. P. 1515–1529. https://doi.org/10.10022015JF003467.
35. *Usov N., Khaitov V., Smirnov V., Sukhotin A.* Spatial and temporal variation of hydrological characteristics and zooplankton community composition influenced by freshwater runoff in the shallow Pechora Sea // Polar Biology. 2019. V. 42. P. 1647–1665. https://doi.org/10.1007/s00300-018-2407-1
36. *Waage M., Portnov A., Serov P. et al.* Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. P. 630–650. https://doi.org/10.1029/2018GC007930

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кохан Андрей Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, мл. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: kkkkk1987@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5237-5080

Еременко Екатерина Андреевна – канд. геогр. наук, доцент, МГУ им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Российская Федерация
E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

Мороз Евгений Андреевич – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: morozzea@gmail.com

Денисова Анна Павловна – мл. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация,
E-mail: anden6900@gmail.com

Сухих Елена Александровна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: sukhikh_ea@mail.ru

Ананьев Роман Александрович – ст. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Москва, Российская Федерация
E-mail: corer@mail.ru

Соколов Сергей Юрьевич – д-р геол.-минерал. наук, ст. науч. сотр., Геологический институт РАН, Москва, Российская Федерация
E-mail: sysokolov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7197-852X

Никифоров Сергей Львович – д-р геогр. наук, гл. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова, Москва, Российская Федерация
E-mail: nikiforov@ocean.ru

ABOUT THE AUTHORS

Kokhan, Andrey V. – Cand. Geol.-min. Sc.., Junior Researcher, Geological institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: kkkkk1987@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-5237-5080

Eremenko, Ekaterina A. – Cand. Geogr. Sc., Assoc. Prof.. M.V. Lomonosov MSU, geographical faculty, Moscow, Russian Federation
E-mail: eremenkoeaig@gmail.com

Moroz, Evgeny A. – Cand. Geol.-Min. Sc.., Senior Researcher, Geological institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: morozzea@gmail.com

Denisova, Anna P. – Junior Researcher, Geological institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: anden6900@gmail.com

Sukhikh, Elena, A. – Cand. Geol.-Min. Sc., Senior Researcher, Geological institute of RAS, Moscow, Russian Federation
E-mail: sukhikh_ea@mail.ru

Ananiev, Roman A. – Senior Researcher, P.P. Shirshov Oceanology Institute, Moscow, Russian Federation
E-mail: corer@mail.ru

Sokolov, Sergey Yu. – Doctor Geol.-Min. Sc., Senior Researcher, Geological institute of RAS, Moscow, Russian Federation,
E-mail: sysokolov@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-7197-852X

Nikiforov, Sergey L. – Doctor Geogr. Sc., Chief Researcher, P.P. Shirshov Oceanology Institute, Moscow, Russian Federation
E-mail: nikiforov@ocean.ru

Поступила в редакцию 30.04.2025
После доработки 15.10.2025
Принята к публикации 18.12.2025

Received April 30, 2025
Revised October 15, 2025
Accepted December 18, 2025