

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-157-167



ФЛЮИДОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

✉ *Кохан А.В.¹, Еременко Е.А.^{1,2}, Мороз Е.А.¹, Денисова А.П.^{1,2},
Соколов С.Ю.¹, Никуфоров С.Л.³, Ананьев Р.А.³*

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, Москва

✉ *kkkkk1987@mail.ru*

По результатам многолучевого эхолотирования и акустического профилирования, выполненных в рамках рейсов научно-исследовательских судов «Академик Николай Страхов» и «Академик Борис Петров» в 2018-2023 гг. на двух полигонах и региональных съемочных профилях установлены закономерности распространения флюидогенного рельефа в мелководной части Печорского моря. Проведено картирование форм флюидогенного рельефа представленных преимущественно пингоподобными формами, акустических аномалий в водной толще, участков с различными проявлениями флюидогенных процессов в верхней части разреза четвертичных отложений. Выявлено, что активность флюидогенных процессов, их проявление в разрезе, распространение сопутствующих форм рельефа, и акустических аномалий в водной толще зависят от геоморфологической и геолого-тектонической позиции участка дна, наличия разломных нарушений, мощности и типа многолетней мерзлоты и характера четвертичных отложений.

Ключевые слова: *Арктика, дегазация, флюидогенный рельеф, флюидогенные процессы акустические аномалии в водной толще, многолетняя мерзлота*

Введение и методы исследования. Начиная с конца 1990-х годов с развитием применения новых высокоразрешающих методов исследования дна Мирового океана были обнаружены многочисленные проявления дегазации [Judd, Hovland, 2007]. Дегазация сопровождается формированием специфических положительных (диапиры, пингоподобные формы (pingo-like features, ППФ), дома (domes)) и отрицательных (покмарки различного размера) форм рельефа. Механизм образования этих форм слабо изучен и в настоящее время связывается с поступлением из недр флюидов различного генезиса, развитием процессов пучения донных отложений (положительные формы) [Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007], выбросом флюидов и донных грунтов с образованием кратеров (отрицательные формы) [Waage et al., 2020] и образованием специфических отложений (сопочных брекчий, газо- и газогидратонасыщенных осадков, биохеогенных отложений и пр.) (см. ссылки в работе [Миронюк, 2020]). Дегазация приводит к образованию флюидогенного рельефа, который был предложен в качестве самостоятельного генетического типа С.Г. Миронюком [2020]. Многочисленные проявления флюидогенного рельефа были обнаружены на шельфах морей Арктики [Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007; 2022; Миронюк, Росляков, 2019; Миронюк и др., 2019а,б].

Впервые в морях российского сектора Арктики флюидогенные формы рельефа дна были изучены на полигоне «Диапиры» в 1988 году [Бондарев и др., 2002], а в 1995 году выполнено бурение как непосредственно на самих ППФ, так и на прилегающих участках дна.

В настоящей работе представлены результаты анализа флюидогенного рельефа на дне мелководной части Печорского моря. Анализ выполнялся на основе полевых геофизических данных, полученных в ходе работ на полигонах в мелководной части Печорского моря площадью около 150 км² (полигон №1, захватывает в центральной части полигон «Диапиры», обследованный в 1988 и 1995 гг. [Бондарев и др., 2002]) и 350 км² (полигон №2), а также многочисленных съемочных профилей общей длиной порядка 800

км (Рисунок 1). Экспедиционные работы выполнены авторами в рамках 38-го (2018 г.), 41-го (2019 г.), 49-го (2020 г.) и 52-го (2021 г.), 56-го (2023 г.) рейсов НИС «Академик Николай Страхов» и 51-го (2022 г.) рейса НИС «Академик Борис Петров» в рамках программы «Геолого-геофизические, геоморфологические и гидрофизические исследования в Баренцевом и Карском морях» (руководитель проекта - д.г.н. Никифоров С.Л.) при поддержке РНФ (проект № 22-77- 10091).

На камеральном этапе обработка данных многолучевого эхолотирования выполнялась в программном пакете PDS2000 с построением цифровых моделей рельефа дна разрешением 2x2 м, 5x5 м (на полигоне №1) и 10x10 м (на полигоне №2), 10x10 и 5x5 м (на съемочных профилях). С использованием цифровых моделей рельефа дна в программе QGIS были определены морфометрические параметры ППФ: высота, длина, ширина, площадь основания, периметр, ориентировка. Статистический анализ показателей был выполнен в MS Excel. Обработка сейсмических данных проводилась в программе Edgetech, для интерпретации и визуализации использовались программы SeiSee и Kingdom Software 8.3.

Результаты работ. Обследованная площадь акватории располагается в границах абразионно-аккумулятивной равнины внешней части Печороморского шельфа с отметками глубин от 25-30 до 70-80 м (рис. 1).

В тектоническом отношении район работ расположен в пределах Тимано-Печорской плиты, в зоне контакта Русановской складчато-надвиговой зоны и восточной части Печорской синеклизы (Гуляевско-Долгинской структурной зоны) [Вискунова и др., 2003]. В границах района работ установлено несколько нефтегазоносных структур различного размера, наиболее крупные из которых – Рейнекская, Моржовая и Зверобойная [Вискунова и др., 2003]. Общий выровненный рельеф дна полого снижается в пределах полигона с запада (средняя глубина около 65-70 м) на восток (75-80 м). Территория представляет собой пологоволнистую, местами практически плоскую аллювиально-морскую равнину неоген-голоценового возраста с преимущественно субаквальной моделировкой [Бирюков, Огородов, 2003].

В субмеридиональном направлении равнину пересекают ложбинообразные понижения относительной глубиной до 20-40 м и шириной по бровкам до 20-30 км (рис. 1). В юго-восточной части полигона №1, в тальвеге одного из таких понижений наблюдается останец. В северо-восточной части обследованной акватории одно из таких понижений меняет простирание на северо-восточное, в его тальвеге наблюдается переуглубление с отметками глубин до 90-95 м. Также рельеф равнины осложнен многочисленными положительными эрозионно-аккумулятивными формами различного простирания высотой на участках пересекаемых профилями до 10-20 м, образование которых связано с деятельностью течений.

В строении четвертичного чехла района работ установлено участие трех ССК, согласующиеся со схемой стратиграфии полигона, предложенной в работе [Бондарев и др., 2002] по данным площадной съемки и буровых работ:

1. Залегающий с поверхности ССК I с высокоамплитудной хаотической или слабовыраженной слоистой записью мощностью от 1-2 м до 15-30 м (морские голоценовые отложения или морскими голоценовыми илами, глинами и суглинками (mQIV));
2. Акустически слоистый ССК II видимой мощностью от 5-10 до 20-25 м (аллювиально-морские позднеплейстоценовые (сартанские) суглинки, супеси и глины с ритмичной слоистостью, нередко с линзами торфа (amQIII_{sr}));
3. Акустически непрозрачный ССК III с кровлей, представленной сложно построенной системой отражений различной геометрии и сложным рельефом поверхности (морские глины и суглинки с прослоями песка каргинского и казанцевского возраста (mQIII_{kr+kz})).

В рельефе дна района работ было установлено наличие ряда форм, интерпретируемых нами как флюидогенные: ППФ, валов пучения, покмарок, впадин дегазации. Проявления флюидогенных процессов были отмечены также на разрезах акустического профилографа в верхней части разреза, при очень слабой или отсутствии выраженности в рельефе дна.

Полигон №1 частично охватывает ложбинообразное понижение, протягивающееся с ЮЮВ на ССЗ, видимой длиной около 20 км. В границах полигона относительная глубина его составляет 25-30 м, ширина по нечетким плавным бровкам от 6-8 у южной границы полигона до 20-25 км на севере. В юго-восточной части полигона понижение сужается и раздваивается. В геоморфологическом отношении полигон приурочен к стыку двух макроформ рельефа дна Печорского моря [Бирюков, Огородов, 2003]. Большая его часть располагается в границах абразионно-аккумулятивной раннеплейстоцен-голоценовой холмисто-западной морской равнины (глубины более 50-55 м) со следами допозднеплейстоценовой субаэральной переработки. В южной и восточной частях выделяются фрагменты уступов позднеплейстоцен-голоценовой аккумулятивно-абразионной равнины (глубины менее 50-55 м).

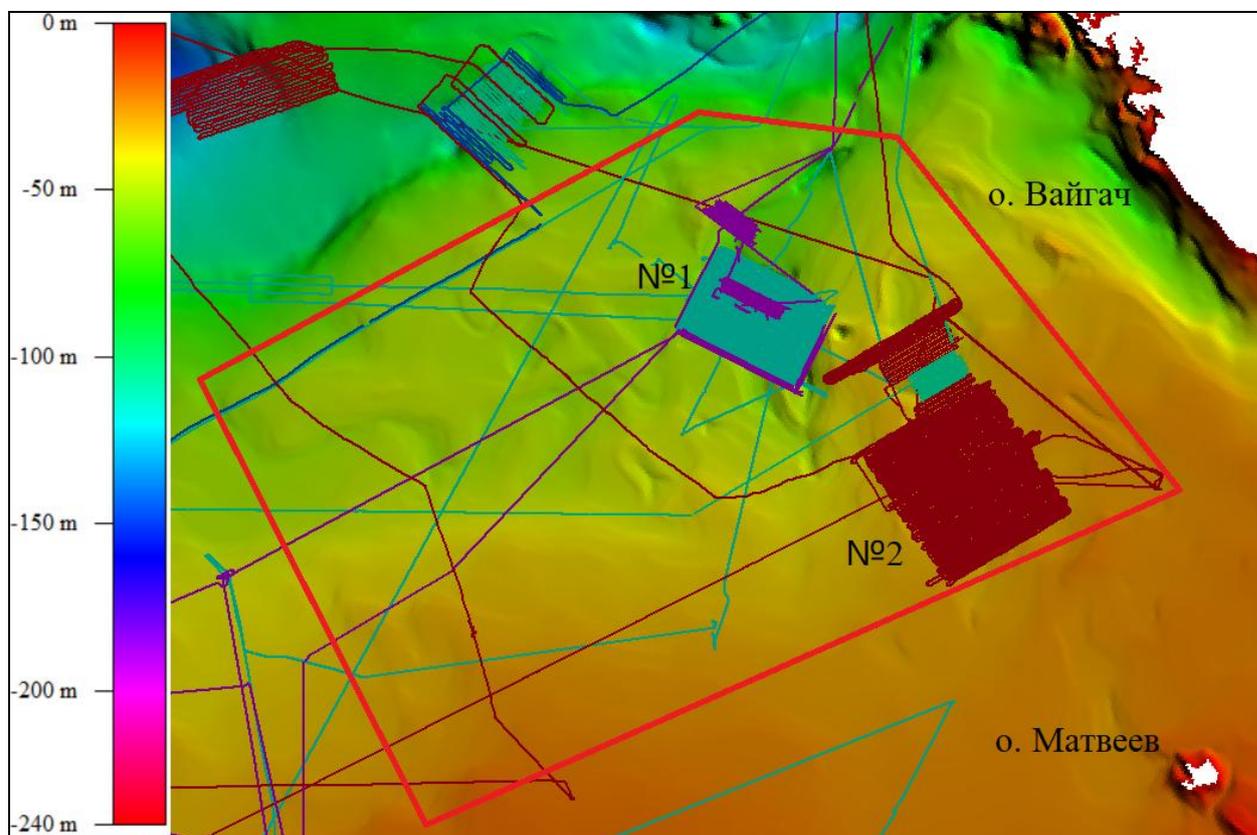


Рис. 1. Съемочные галсы и полигоны (№№1 и 2) работ 2018-2023 гг. и участок, рассмотренный в работе (показан красной рамкой). Рельеф дна показан по данным [Кошель и др., 2014].

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

Полигон №2 охватывает большую часть ложбинообразного понижения, протягивающегося с СЗ на ЮВ, длиной в границах полигона около 26 км. Понижение постепенно выполаживается к югу. Глубины в его тальвеге уменьшаются от 50-55 м до 30-33 м, глубины на границах полигона сокращаются от 40-45 до 30-35 м.

В рельефе полигона выделяются 185 ППФ высотой от 1-2 до 12-16 м, в основном от 4 до 10 м. Ширина ППФ изменяется 30-40 до 130-170 м, в основном составляя 50-80 м. Длина изменяется от 45-50 м до 120-150 м, в основном составляя 60-90 м. Крутизна склонов ППФ не превышает 20-25°, в основном составляя 10-15°.

Для ППФ полигона №2, в отличие от аналогичных форм полигона №1, не характерны округлые компенсационные впадины полностью окружающие ППФ. На изученном полигоне наблюдаются удлиненные впадины к северу и северо-востоку от ППФ. Их длина составляет от 50-70 до 200-250 м, относительная глубина - до 2-3 м. Характерно, что длинные оси ППФ ориентированы субперпендикулярно простиранию впадин. Впадины ориентируются в северном и северо-восточном направлении. К югу от ППФ впадины сnivelированы осадконакоплением.

На основе результатов многолучевой съемки установлено наличие пяти морфологических типов ППФ на обследованных полигонах, где они распределены неравномерно.

Тип 1: ППФ этого типа располагаются на ровном дне, это самые крупные формы с диаметром от 100 до 250 м, высотой от 12-15 до 20-25 м, округлыми очертаниями в плане, как правило обладающие компенсационными понижениями по контуру, глубиной от 1 до 3-4 м, зачастую в их вершинных частях наблюдаются воронки глубиной до 1-1.5 м, склоны поднятий этого типа осложнены оплывоподобными псевдотеррасами и также для них характерно образование кластеров в виде 2-3 слившихся или непосредственно примыкающих друг другу форм без четко выраженного общего основания, крутизна склонов поднятий составляет от 10-15 до 25-35°. ППФ этого типа развиты в северо-западной части полигона №1 с максимальными глубинами до 55-80 м

Тип 2: ППФ этого типа располагаются на ровном дне, это менее крупные формы с диаметром от 35-50 м до 120-170 м, высотой от 5-7 до 10-12 м, поднятия не сливаются друг другом, редко окружены компенсационными впадинами. Крутизна склонов форм не превышает 10-15°.

Тип 3: ППФ этого типа располагаются на ровном дне, это наименее крупные формы высотой от первых метров до 5-7 м и диаметром до 100-120 м. Крутизна склонов форм не превышает 10-15°.

ППФ 1 и 2 типа повсеместно представлены в границах обследованных полигонов в диапазонах глубин от 80-85 до 30-35 м.

Тип 4: группы поднятий, соединенных между собой и расположенных на едином фундаменте удлиненной в плане формы, длина такого основания изменяется от 200-300 до 700-800 м, высота поднятий может достигать вместе с основанием 50-70 м, что характерно, поднятия, как правило удлинены в субширотном направлении. Крутизна склонов форм не превышает 10-15°.

Тип 5: крупные неправильной в плане формы массивы с надстроенными на них удлиненными поднятиями высотой до 15-20 м, крутизна уступов массивов может достигать 25-35°. ППФ типа 3 и 4 приурочены к центральной части полигона №1 с максимальной плотностью газопроявлений и ППФ, а также к крайней южной и наименее мелководной части полигона №2.

Наряду с ППФ на обследованных полигонах представлены следующие микро- и мезоформы рельефа, связываемые с флюидогенными процессами. В северо-западной части полигона №1 отмечаются плоские пониженные участки дна – впадины с нечеткими бровками, относительной глубиной 5-10 м, в поперечнике от 200-300 до 600-800 м, расположенные хаотично, иногда группами из двух-трех форм.

Повсеместно в границах полигона №1, прослеживаются многочисленные пологосклонные линейные возвышения преимущественно субмеридионального простирания, в морфологическом отношении напоминающие сглаженные валообразные поднятия. В южной части полигона их высота достигает 8-10 м, ширина – 500-700 м, крутизна склонов достигает 5-8°. Вдоль северной границы высота форм достигает 10-12 м,

ширина – 200-300 м. Округлые гребни валообразных поднятий осложнены хорошо выраженными в рельефе рвами относительной глубиной до 2-3 м и шириной 8-12 м.

В восточной части полигона №1 обнаружены слабовыраженные покмарки в виде изометричных замкнутых блюдцеобразных понижений глубиной 1-2 м, диаметром до 70-100 м. Характерно, что все установленные покмарки отмечаются на уступе раннеплейстоцен-голоценовой холмисто-западинной морской равнины в северо-восточной части полигона и не наблюдаются как отдельные образования на участках развития ППФ. Возможно, размеры этих форм находятся за пределами разрешения имеющихся у нас цифровых моделей рельефа дна, либо такие формы там полностью отсутствуют.

В границах полигонов выявлены многочисленные вертикальные акустические аномалии в водной толще типа «факел» (ААВТ) (рис. 2). В границах полигона №1 их выявлено 608 шт., в северной части полигона №2 – 162 шт. (данные по южной части полигона еще не были интерпретированы). ААВТ как правило приурочены к ППФ. Так, среди ППФ пересекаемых съемочными профилями, порядка 60-80% форм в различных частях полигонов отличаются наличием акустических аномалий. Съёмки в северной части полигона №1 в 2018 и 2019 гг. показали, что из 102 шт. ППФ пройденных съемочными галсами и с установленными ААВТ над 74 ППФ они фиксировались в ходе обоих съемок.

В ходе работ на съемочных галсах в акватории вне полигонов детальных исследований район развития флюидогенных форм был установлен в 12 км северо-востоку от полигона №1. Здесь на участке, расположенном на стыке нескольких транзитных профилей на северном склоне переуглубленного ложбинообразного понижения обнаружено 4 ППФ типа 1 диаметром до 100 м и высотой до 3 м. К югу от них отмечается участок развития слабовыраженных округлых впадин диаметром до 200-300 м и глубиной до 3 м. В границах участка отмечено 4 газопроявления. На остальной длине съемочных профилей флюидогенных форм не было отмечено.

На полученных на съемочных профилях разрезах акустического профилографа отмечается несколько типов строения разреза, в сочетании с отмеченными акустическими аномалиями в водной толще (порядка 300 шт.), отражающими распространение флюидогенных процессов (рис. 2).

Тип 1р: В южной и юго-западной части участка работ освещение разреза не превышает 0,005-0,007 мс. Практически повсеместно у поверхности дна залегает непроницаемая акустическая граница неровной гребенчатой формы, ассоциируемая с кровлей газонасыщенных отложений. ААВТ на участках профилей единичны.

Тип 2р: В центральной части участка работ освещение разреза повышается до 0,015-0,020 мс. Наряду с участками с непроницаемой акустической границей неровной гребенчатой формы (кровля газонасыщенных отложений), отмечаются фрагментарные массивы с выровненным волнистым акустическим фундаментом (кровля газонасыщенных, и, возможно, мерзлых отложений). В разрезе отмечается две пачки отложений ССКІ – с хаотическим характером отражений (залегает с поверхности) и с высокоамплитудными слоистыми отражениями (в нижней части разреза ССК). ААВТ на участках профилей малочисленны и встречаются в виде небольших групп на длине профилей до 3-5 км.

Тип 3р: При приближении к полигонам в восточной части работ наблюдаются участки с кровлей ССКІІ на глубинах от 0,005 до 0,020 мс с волнистой поверхностью. Отложения ССКІ перекрывают их с поверхности, и сглаживают неровности кровли. На участках, где кровля ССКІІ приближается к поверхности прослеживаются ААВТ.

Тип 4р: При приближении к полигонам в восточной части района работ амплитуда поднятий кровли ССКІІ возрастает и они получают выражение в рельефе дна. На отдельных участках перекрывающие отложения ССКІ выклиниваются или обладают минимальной мощностью.

Тип 5р: Этот тип разреза характерен для полигонов развития ППФ и окружающих участков. Формы флюидогенного рельефа выражены повсеместно, также повсеместно представлены отложения всех выделенных ССК (I-III). На отдельных участках кровля ССКIII прослеживается устойчиво в виде поднятий и впадин. На отдельных участках она прослеживается фрагментарно, при этом многочисленны линзовидные высокоамплитудные аномалии в толще ССКIII. Отложения ССКIII выходят на поверхность в форме ППФ или приближаются к поверхности дна в форме валообразных поднятий, на склонах которых обнажаются отложения ССКII. Слагающие поверхность дна впадины заполнены отложениями ССКI. На отдельных участках эти впадины сnivelированы осадконакоплением, на отдельных участках – переуглублены с мощностью отложений до 10-15 м. Преимущественно к ППФ приурочены ААВТ. Они встречаются также и в осевых частях валообразных поднятий.

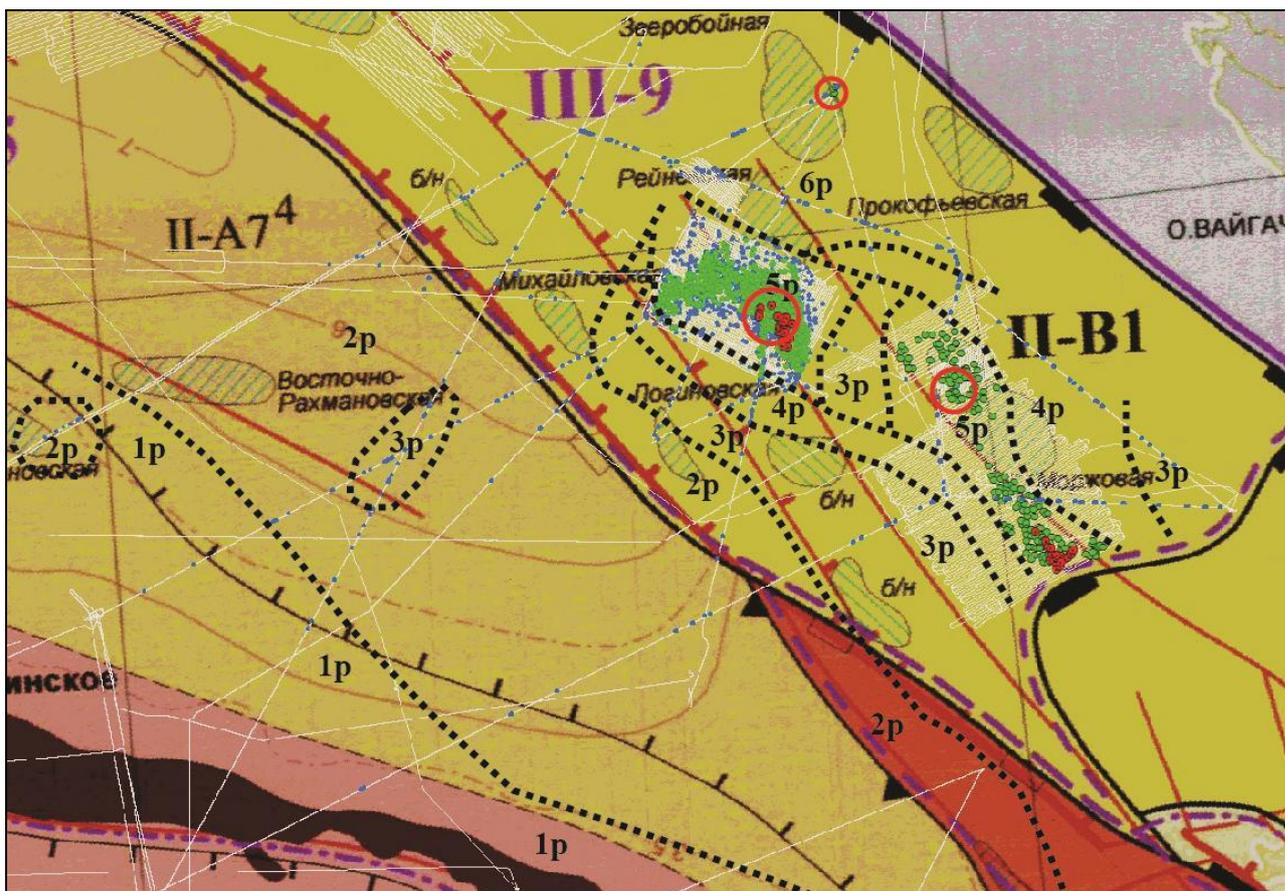


Рис. 2. Флюидогенный рельеф мелководной части Печорского моря.

На рисунке показаны: зеленые точки – ППФ типов 1-3, красные точки – ППФ типов 4-5 (описание см. в тексте), синие точки – ААВТ, пунктирными линиями показаны предполагаемые границы участков развития различных типов разреза (описание см. в тексте). Красными кругами показаны участки максимальной интенсивности флюидогенных процессов (с выраженными в рельефе дна ППФ и другими формами, максимальной плотностью газопроявлений). В качестве подложки использована Карта перспектив нефтегазоносности комплекта Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1000000 (второе поколение). Западно-Сибирская серия. Лист R-38-40 [Вискунова и др., 2003].

Тип 6р. В северной части района работ с наибольшими глубинами в строении разреза отмечается сочетание участков с высокой мощностью отложений ССКI, по-видимому, связанных с аккумулятивными телами типа контуритов и полного их размыва, приуроченных к районам активной эрозионной деятельности течений. ССКII на обширных участках залегает с поверхности и отличается значительно разнящейся

глубиной освещения от 0,003-0,005 до 0,035-0,045 мс, что, вероятно, связано с различиями в степени газонасыщения осадков. В разрезе ССКII хорошо прослеживается слоистость с пологими и малоамплитудными складками, не получающими развитие в форме валообразных облекающих структур. Кровля ССКIII трассируется повсеместно и преимущественно ступенчатая и слабовыпуклая. На отдельных участках она пикообразно поднимается к поверхности. Как правило, к таким участкам приурочены ААВТ.

Обсуждение результатов и выводы. Результаты предшествующих исследований зарубежных и отечественных авторов [Кохан и др., 2023; Мороз и др., 2023; Bogoyavlensky et al., 2018; Bogoyavlensky et al., 2022; Paul et al., 2007; 2022; Thorsnes et al., 2023] позволяют выявить закономерности в распространении флюидогенных форм на шельфах Арктики, определяемые сложным сочетанием ряда факторов: 1) распространением и мощностью толщ многолетнемерзлых пород (ММП), подстилающих их толщ подмерзлотных газогидратов, а также толщи приповерхностных глубоководных газогидратов; 2) условиями залегания нефтегазоносных структур и пород с коллекторскими свойствами; 3) наличием благоприятных структурно-геологических условий для притока пресных вод суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты на шельфе; 4) отрицательной температурой придонных вод, способствующей охлаждению содержащих пресную воду флюидов и промерзанию дна.

Район работ характеризуется наличием ММП. Непосредственно на полигоне №1 ММП вскрыты бурением на глубинах от 0,4 м до 25-30 м [Бондарев и др., 2002], южнее (в пределах Варандейской и Приразломной нефтегазоперспективных площадей, глубины моря 15-25 м) – на глубине от 22 до 40 м, льдистость ММП изменяется в широких пределах – от 10-30% до 50% и более. [Мельников, Спесивцев, 1995]. По данным сейсмопрофилирования островные ММП распространены до изобат 80-100 м [Бондарев и др., 2002]. По результатам моделирования подошва ММП залегает на глубинах до 200-300 м, средние значения льдистости верхних 70 м разреза составляют от 5-10 до 130 м³/м² [Overduin et al., 2019]. По результатам моделирования [Malakhova, 2020] кровля зоны стабильности газогидратов залегает в диапазоне глубин 140-180 м от дна, мощность ее достигает 400-500 м. Структурный план восточной части района работ определяется надвигами Гуляевско-Долгинской структурной зоны СЗ-ЮВ простирания, к разломам приурочены нефтегазоносные структуры [Вискунова и др., 2003]. На наш взгляд, подток пресных вод вдоль подошвы ММП в изученном районе может быть ограничен из-за структурного плана акватории – разломы северо-западного простирания будут служить зонами растепления мерзлоты и разгрузки пресных вод мигрирующих вдоль подошвы ММП, в глубокие горизонты либо к поверхности. Основные источники поступления пресных вод в виде таликов бассейнов р. Печора и Хайпудыр расположенные к югу и юго-западу будут блокированы разломами (рис. 2). По всей вероятности, основным источником водной составляющей флюида в районе работ будут выступать глубинные воды, поступающие вдоль разломов в условиях неотектонической активности [Крапивнер, 2007]. Согласно [Bogoyavlensky et al., 2018] район работ характеризуется отрицательной температурой придонных вод.

Выделенные типы разреза, по-видимому, фиксируют нарастание активности флюидогенных процессов от типа 1р к типам 5р/6р. По полученным данным хорошо видно, что западная часть района работ отличается слабой их интенсивностью с отдельными островными ареалами активизации связанными с локальными неоднородностями строения разреза ММП и четвертичных отложений. Активность флюидогенных процессов возрастает по мере приближения к центральной части системы надвигов Гуляевско-Долгинской структурной зоны. Очаги с максимальной плотностью ППФ, газопроявлений, развитием ППФ типов 1, 4 и 5 приурочены к стыкам разломных зон и краевых частей нефтегазоносных структур, что подчеркивает глубинный характер флюидогенных процессов и сопутствующих форм рельефа дна и ААВТ (рис. 2).

При этом важную роль в распределении потока флюида в верхней части разреза играют неоднородности толщи четвертичных отложений. Над рядом крупных разломов, в том числе регионального класса, не фиксируются очаги развития флюидогенных процессов и сопутствующих форм рельефа (рис. 2). Четвертичные отложения определяют фокусировку/рассеяние потоков флюидов в зависимости от их литологического состава и выступают субстратом, вовлекаемым в процесс образования форм, в частности участки развития ППФ могут приурочены к ареалам повышенной мощности пластичномерзлых глинистых отложений каргинского и казанцевского возраста. На локальном уровне колебания мощности ММП, геометрия кровли ММП, унаследованные от субаэрального времени элементы палеокриогенного рельефа выступают определяющим фактором формирования зон АВПД (ММП, по-видимому, играют роль верхнеуровневого регионального флюидоупора) и последующего образования валообразных поднятий, зон зарождения и последующего развития ППФ. Таким образом, флюидогенные формы района работ являются комплексными образования, чей генезис в первую очередь определяется процессами грязевого вулканизма и глубинной флюидодинамики. Но их развитие и распределение на дне на локальном уровне определяется строением четвертичных отложений и толщи ММП.

Благодарности. Экспедиционные исследования и их камеральная обработка выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-77- 10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

ЛИТЕРАТУРА

Бирюков В.Ю., Огородов С.А. Рельеф дна Печорского моря // Труды на Института по океанология. 2003. Т. 4. С. 105-110.

Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.

Вискунова К. Г., Каленич А. П., Маркина Н. В., Шкарубо С. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (второе поколение). Западно-Сибирская серия. Лист R-38-40. Карта полезных ископаемых и прогноза нефтегазоносности. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2003

Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестник МГУ. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. doi:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9

Кошель С.М., Кошель А.М., Ушакова Л.А. Картографирование рельефа дна северных морей России с использованием цифровых моделей. Интер-Карто/ИнтерГИС-20 Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение. Материалы международной конференции, Белгород, Харьков (Украина), Кигали (Руанда) и Найроби (Кения), 23 июля-8 августа 2014 г. Издательство Константа Белгород, 2014, С. 417-423.

Крививнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. №2. С. 73-89.

Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма, 1995. 194 с.

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. 2020. Москва. С. 37-43.

Миронюк С.Г., Иванова А.А., Хлебникова О.А. Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазоносности недр шельфа // Труды VII Международной научно-практической конференции. Том II (IV). 2019б. Изд-во ООО "ПолиПРЕСС". С. 120-131.

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. 2019а. Т. 5. С. 192-196.

Миронюк С.Г., Росляков А.Г. Типы, активность и закономерности распространения покмарок в арктических морях // Труды VII Международной научно-практической конференции. Том II (IV). 2019. Изд-во ООО "ПолиПРЕСС". С. 70-76.

Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П. и др. Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского желоба (Печорское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 5–11. doi:10.31857/S2686739723600820

Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 138. doi:10.1016/j.marpetgeo.2022.105527

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

Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Cambridge University Press. 2007. 492 p.

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. Vol. 606. doi:10.1088/1755-1315/606/1/012035

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

Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. Vol. 119. Is. 12. doi:10.1073/pnas.2119105119

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

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

Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor // Sci. Rep. 2020. Vol.10. №8450. doi:10.1038/s41598-020-65018-9

FLUIDOGENIC TOPOGRAPHY OF SHALLOW PART OF PECHORA SEA

Kokhan A.V.¹, Eremenko E.A.^{1,2}, Moroz E.A.¹, Denisova A.P.^{1,2}, Sokolov S.Yu.¹, Nikiforov S.L.³, Ananyev R.A.³

¹Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³P. P. Shirshov Oceanology Institute of RAS, Moscow, Russia

Basing on results of multibeam echsounding and acoustic profiling performed during expeditions of research vessels "Akademik Nikolai Strakhov" and "Akademik Boris Petrov" in 2018-2023 on two polygons and regional profiles regularities of occurrence of fluidogenic processes of the shallow part of Pechora Sea were established. Mapping of fluidogenic forms presented mainly by pingo-like features, acoustic anomalies in water, areas with different manifestations of fluidogenic processes in the upper part of section of quaternary sediments was performed. It was

established that activity of fluidogenic processes, their manifestation in the section, occurrence of acoustic anomalies in water depend on geomorphological and geological-tectonic position of the area, presence of faults, thickness and type of permafrost and structure of quaternary deposits.

Keywords: *Arctic, degassing, fluidogenic landforms, fluidogenic processes, acoustic anomalies in water, permafrost*

REFERENCES

- Biryukov V.Yu., Ogorodov S.A.* Relief of the bottom of the Pechora Sea // Trudove at the Institute of Oceanology. 2003. Vol. 4. P. 105-110.
- Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A., Dlugach A.G., Polyakova N.A.* Sub-permafrost gas accumulations in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea // Russian Geology and Geophysics. 2002. Vol. 43. No. 7. P. 587–598.
- Viskunova K.G., Kalenich A.P., Markina N.V., Shkarubo S.I.* State geological map of the Russian Federation at a scale of 1:1000000 (second generation). West Siberian series. Sheet R-38-40. Map of mineral resources and forecast of oil and gas content. SPb.: VSEGEI Cartographic Factory. 2003
- Kokhan A.V., Moroz E.A., Eremenko E.A.* and others. Fluidogenic relief of permafrost areas on the shelf of the Pechora and Kara seas // Bulletin of Moscow State University. Ser. 5. Geogr. 2023. Vol. 78. No. 3. P. 104–124. doi:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9
- Koshel S.M., Koshel A.M., Ushakova L.A.* Mapping the bottom relief of the northern seas of Russia using digital models. Inter-Carto/InterGIS-20 Sustainable development of territories: cartographic and geoinformation support. Proceedings of the international conference, Belgorod, Kharkov (Ukraine), Kigali (Rwanda) and Nairobi (Kenya), July 23-August 8, 2014. Publishing house Constanta Belgorod, 2014, pp. 417-423.
- Krapivner R.B.* Indications of neotectonic activity at the Barents sea shelf // Geotectonics. 2007. Vol. 41. № 2. P. 149-162. doi: 10.1134/S0016852107020057
- Melnikov V.P., Spesivtsev V.I.* Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara seas. Novosibirsk: Science. Sib. ed. firm, 1995. 194 p.
- Mironyuk S.G.* Fluidogenic formations: justification for identifying a new genetic group of seabed relief // VIII Shchukin Readings: relief and environmental management. Materials of the All-Russian conference with international participation. 2020. Moscow. pp. 37-43.
- Mironyuk S.G., Ivanova A.A., Khlebnikova O.A.* Fluidogenic landforms as indicators of oil and gas potential of the shelf subsurface // Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. Volume II (IV). 2019b. Publishing house "PolyPRESS" LLC. pp. 120-131.
- Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A.* and others. Mud volcanic structures (volcanoids) of the Kara Sea: morphological features and structure // Geology of the seas and oceans: Proceedings of the XXIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology. M. IO RAS. 2019a. T. 5. pp. 192-196.
- Mironyuk S.G., Roslyakov A.G.* Types, activity and patterns of distribution of pockmarks in the Arctic seas // Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference. Volume II (IV). 2019. Publishing house "PolyPRESS" LLC. pp. 70-76.
- Moroz E.A., Eremenko E.A., Denisova A.P.* et al. The Manifestation of Degassing in the Sedimentary Cover and Relief of the Southern Novaya Zemlya Trench (Pechora Sea) // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 512. Is. 1. P. 773–778. doi: 10.1134/S1028334X23601013
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G.* Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 138. doi:10.1016/j.marpetgeo.2022.105527
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al.* Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. 2018. Vol. 8. Is. 12. 453. doi:10.3390/geosciences8120453
- Judd A., Hovland M.* Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Cambridge University Press. 2007. 492 p.
- 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. Vol. 606. doi:10.1088/1755-1315/606/1/012035
- Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F.* et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. Is. 6. P. 3490-3507. doi: 10.1029/2018JC014675

Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. Vol. 119. Is. 12. doi:10.1073/pnas.2119105119

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

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

Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor // Sci. Rep. 2020. Vol.10. №8450. doi:10.1038/s41598-020-65018-9