doi:10.24412/2687-1092-2021-8-73-81

РЕЛЬЕФООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ ДЕГАЗАЦИИ НА БАРЕНЦЕВО-КАРСКОМ ШЕЛЬФЕ

[1]*Еременко Е.А.*, [1]*Денисова А.П.*, [2]*Мороз Е.А.*, [1]*Мазнев С.В.*, [3]*Архипов В.В.*

[1]Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
eremenkoeaig@gmail.com
[2]Геологический институт РАН, Москва, Россия
[3]Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненного осенью 2021 года в рамках 52 рейса НИС «Академик Николай Страхов» установлено широкое распространение процессов дегазации в юго-восточной части Баренцевоморского и юго-западной части Карского шельфа. Проанализирован характер проявления процессов дегазации в разрезе осадочной толщи на дне. Участки дегазации фиксируются в строении осадочного чехла в виде акустического осветления и аномалий типа «плоское пятно», «яркое пятно» в виде локального прогибания рефлекторов, в водной толще – в виде сфокусированных факелообразных или площадных участков повышенной акустической мутности водной толщи.

Рельефообразующая роль дегазации проявляется не повсеместно, в частности, покмарки (газовые грифоны) наиболее характерны для участков с повышенной мощностью хорошо стратифицированных морских осадков. На значительных пространствах дна шельфа дегазация не приводит к образованию специфического микрорельефа, а выражена лишь на сейсморазрезах в виде акустических аномалий. На изученных участках дна установлена связь между фоновым рельефом дна и ориентацией ареалов покмарок, в частности, увеличение их плотности фиксируется в днищах линейно вытянутых понижений и на перегибах донного рельефа.

Ключевые слова: *шельф, дегазация, покмарки, акустические аномалии, Баренцево море, Карское море*

В последние десятилетия в связи с интенсивным развитием аппаратной базы гидроакустических систем, используемых при геолого-геоморфологических исследованиях в Мировом океане, появилась возможность детального изучения скоплений газа в воде и осадочном чехле на шельфах Российской Арктики. Сфокусированный апвеллинг флюидов в пределах морских акваторий [*Judd, Howland, 2008*] (в частности, метана) из недр Земли в приповерхностные горизонты морских осадков и водную толщу приводит к образованию специфического микрорельефа поверхности дна. В районах, где флюиды подходят к поверхности и/или просачиваются в водную толщу, в рельефе нередко наблюдаются многочисленные воронкообразные понижения – покмарки (*газовые грифоны, pockmarks, seafloor pockmarks* – по [*Мазарович, 2018*]). За счет выдавливания неконсолидированного осадка под воздействием дегазации на морском дне нередко образуются и положительные микроформы рельефа. В отдельных случаях возникают достаточно крупные пингоподобные поднятия со сложной морфологией [*Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007; Serov et al., 2015*]. На шельфах арктических морей рельеф, созданный процессами дегазации, распространен очень широко [*Соколов и др., 2021*], однако его морфология, степень выраженности и плотность форм сильно различаются в зависимости от сочетания комплекса факторов, прежде всего, литологического состава поверхностного донного субстрата, мощности морских осадков, наличия многолетней мерзлоты и др. Влияние геолого-геоморфологических факторов на характер проявления дегазации (с образованием флюидогенного [*Миронюк, 2020*] микрорельефа или без него) до сих пор остается мало изученным. Целью выполненных исследований было выявление связи между геолого-геоморфологическим строением дна и морфологией флюидогенного микрорельефа в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа, центральной и южной частях Карского шельфа.

Исследования основаны на результатах геофизических работ, выполненных в 52 рейсе НИС «Академик Николай Страхов» в Баренцевом и Карском море осенью 2021 года.

Многолучевая батиметрическая съемка производилась с помощью эхолота Reason Seabat 8111 с частотой сигнала 100 кГц, установленного на НИС «Академик Николай Страхов». Исследование верхней части осадочного чехла осуществлялось с использованием профилографа Edgetech 3300 с модулируемым сигналом 2-12 кГц. Данный частотный диапазон позволяет изучать верхнюю рыхлую часть разреза с проникновением в тонкослоистые осадки на глубину до 100 м. Работы производились в пределах ключевых полигонов на параллельных галсах с эффективным перекрытием между ними около 20% (после удаления краевых некондиционных отскоков). Обработка данных многолучевой батиметрической съемки производилась операторами вручную в программном пакете PDS V3.4.7.1. На сейсмоакустических профилях выявлены участки проявления дегазации на дне, а также акустические аномалии фиксирующие газонасыщенные горизонты в разрезе.

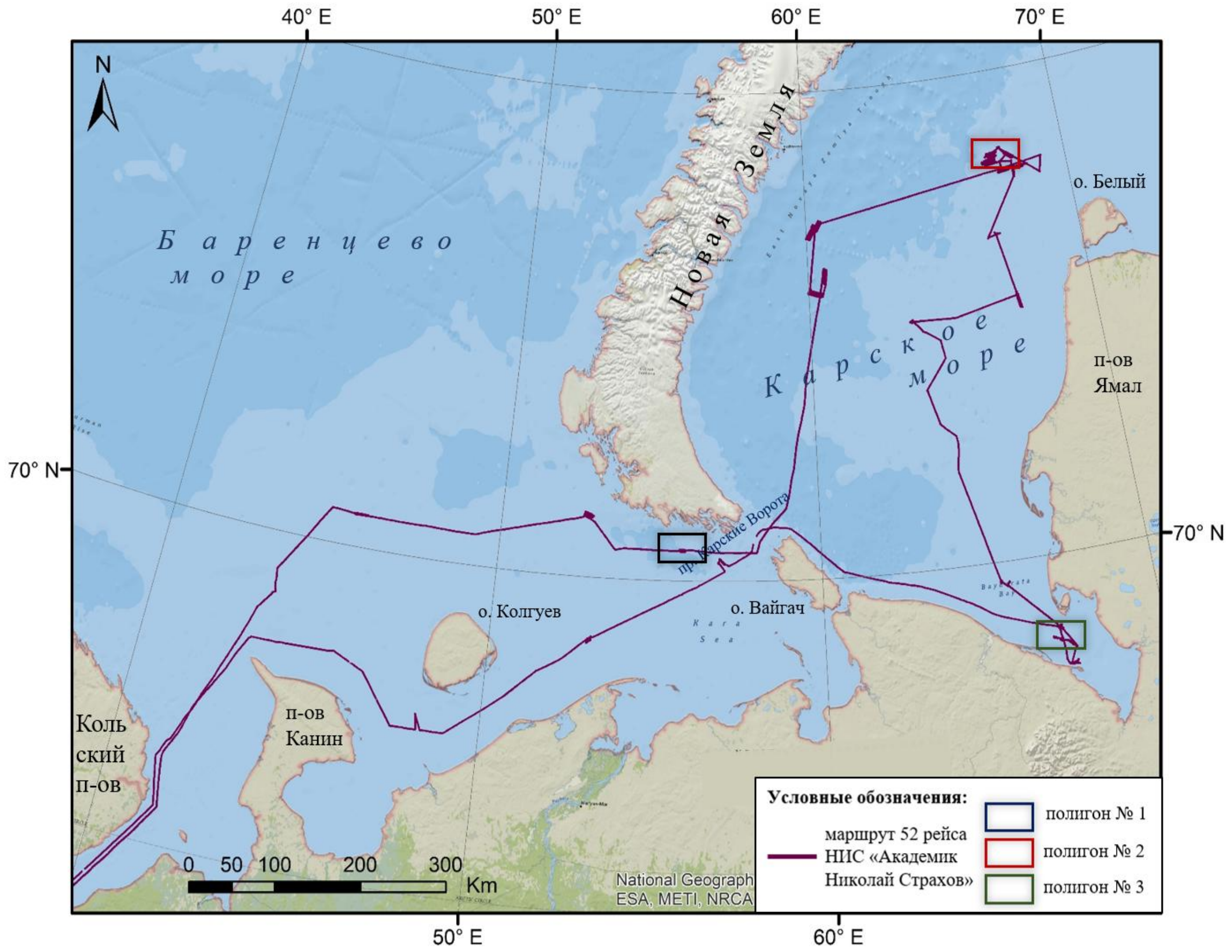

Рис. 1. Местоположение полигонов исследования (топооснова – карты National Geographic, https://www.arcgis.com/home/item.html)

Полигон №1 расположен в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа к западу от пролива Карские ворота (Рис. 1) на глубинах от 110 до 210 м (Рис. 2). Установлено наличие на дне ложбинообразного понижения, пересекающего полигон с северо-запада на юго-восток. Ширина понижения в юго-восточной части полигона составляет около 230 м, в северной части – около 1700 м. Наибольшие глубины в пределах полигона (порядка 210 м) фиксируются в днище данной формы. Поперечный профиль ложбины асимметричный (крутизна северо-восточного борта составляет около 3-4˚, юго-западного – около 2˚). Днище ложбины мелкобугристое. Ложбина пересекает в целом выровненную поверхность дна, прислоненную к подводной возвышенности в северо-восточной части полигона. В относительно приподнятом и расчлененном рельефе северо-восточной части полигона прослеживается чередование гряд и межгрядовых понижений, перепад высот составляет 15-20 м. Гряды параллельны друг другу и имеют субширотную ориентацию. Морское дно в пределах всего полигона сложено с поверхности стратифицированными морскими осадками мощностью 30-40 м и более (для выровненной поверхности на глубине 160-170 м характерно убывание мощности осадков по мере удаления от ее тылового шва). В днище ложбины мощность осадков составляет около 20 м. Необходимо отметить, что рельеф поверхности нижележащего горизонта (подстилающего морские осадки) является более расчлененным, ложбинообразное понижение в нем не выражено.

На юго-западном склоне ложбинообразного понижения и в его днище обнаружены серии покмарок, представляющие собой ориентированные параллельно тальвегу ложбины цепочки из 4-6 изометричных форм. Всего насчитывается около 25 покмарок. Диаметр форм изменяется от 35-40 до 55-60 м, глубина – от 1 до 3 м (Рис. 2). Важно отметить, что некоторые из них (в днище ложбины) имеют несколько уплощенную в плане форму. Выделяются две геоморфологические позиции, в которых проявляется дегазация на данном полигоне, - днище ложбинообразного понижения и его бровки. На сейсмоакустических профилях в пределах полигона установлены акустические аномалии в осадках, связанные с процессами дегазации. В разрезе фиксируются вертикальное осветление и прогибание рефлекторов, маркирующие каналы выходы газа (рис. 3). В рельефе наблюдаются блюдцеобразные понижения (покмарки). На акустическом профиле с применением программного усиления обнаруживается повышенная акустическая мутность придонной водной толщи, которая, по-видимому, является результатом взмучивания поверхности дна при дегазации (Рис. 3, врезка).

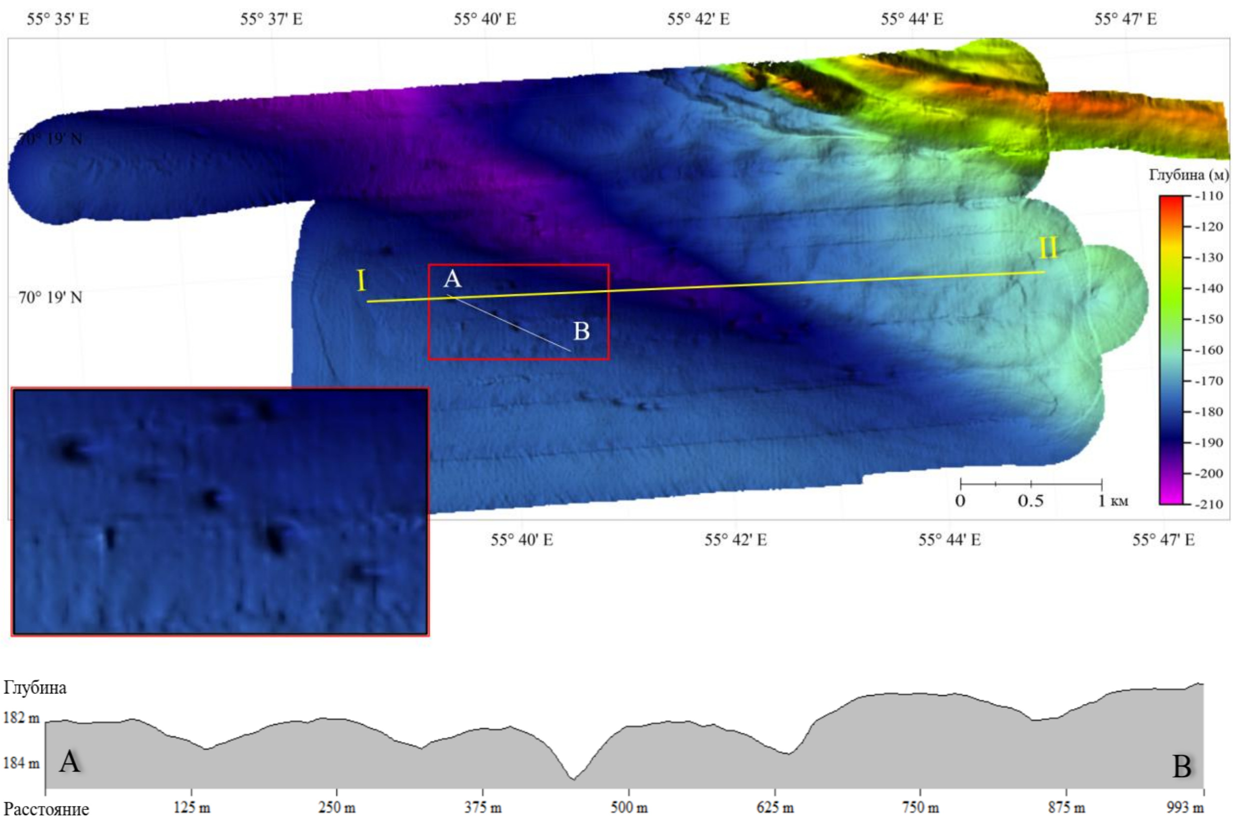

Рис. 2. Цифровая модель рельефа дна на полигоне №1 и батиметрический профиль по линии АВ

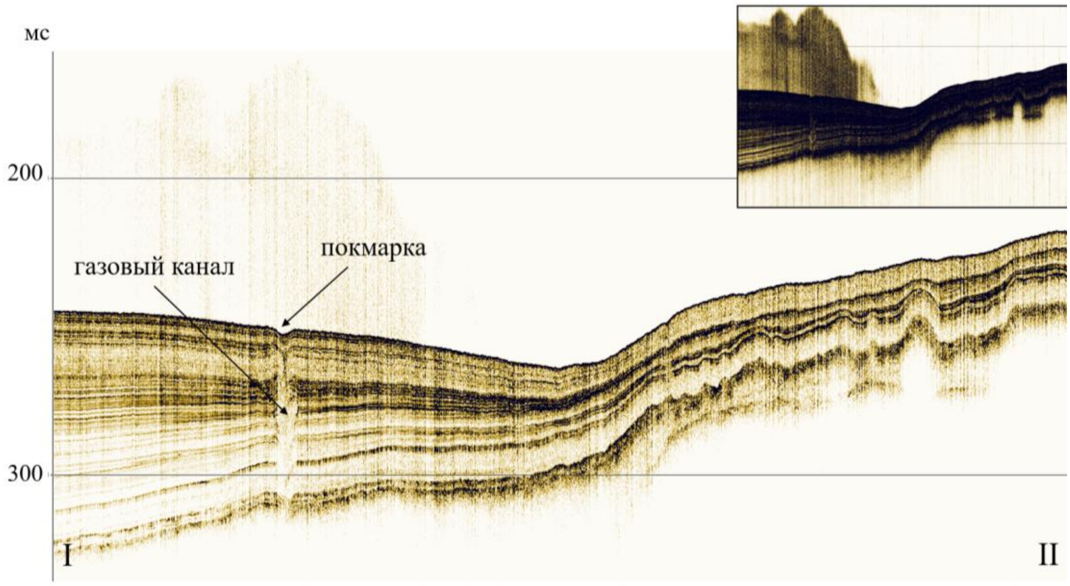

Рис. 3. Акустическая аномалия «газовый канал» на временном разрезе (профилограф, 2-12 кГц). Положение профиля I-II показано на рис.2. На врезке – участок с повышенной акустической мутностью водной толщи в районе развития покмарок вдоль линии профиля I-II (с использованием программного усиления)

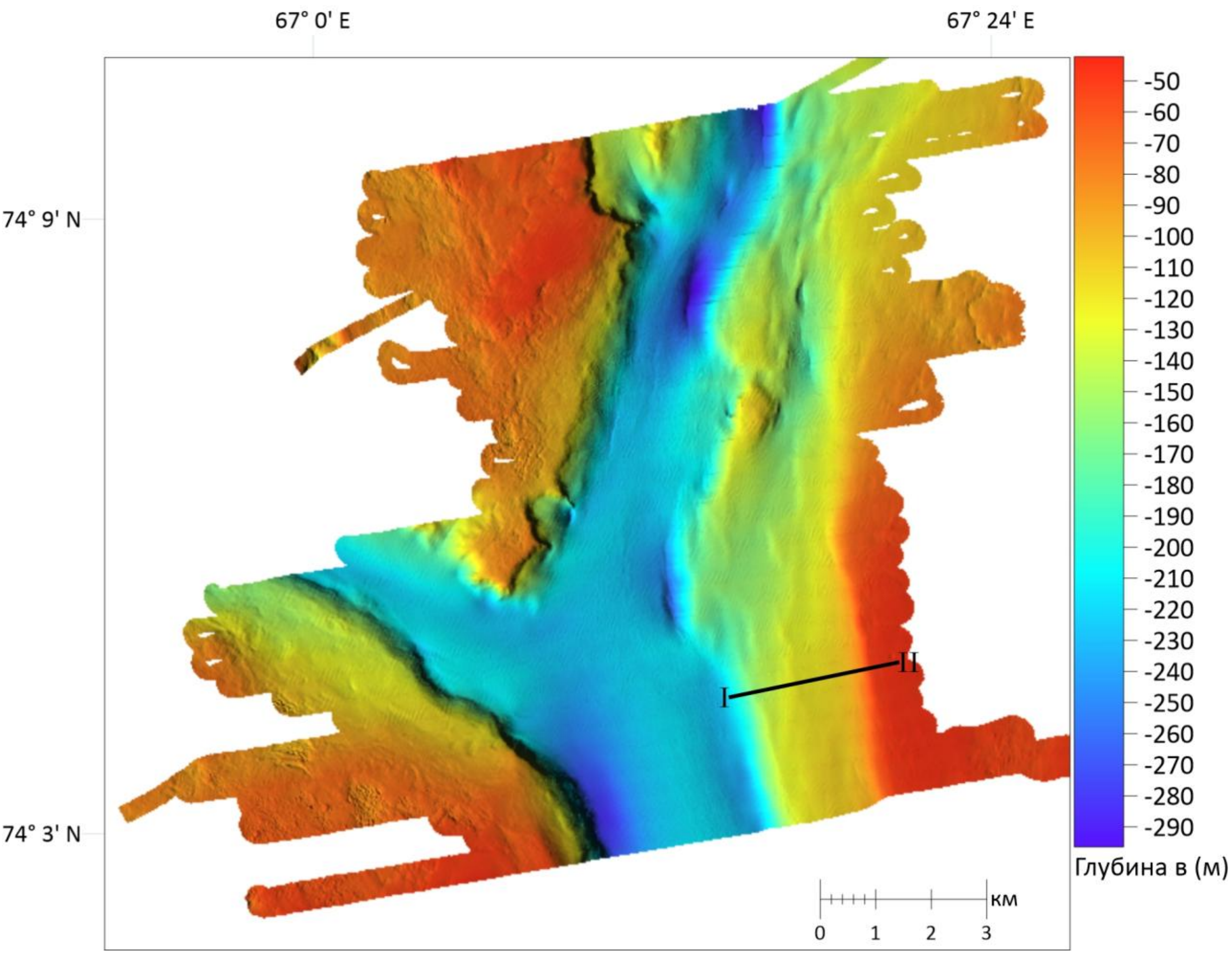

Рис. 4. Цифровая модель рельефа дна на полигоне №3 и положение сейсмоакустического профиля I-II

Анализируя условия образования флюидогенного рельефа на полигоне №1 можно заключить следующее: 1) участки дегазации фиксируются в разрезе в виде вертикального осветления и в водной толще в виде участков с повышенной мутностью; 2) ориентация областей распространения покмарок имеет тесную связь с макрорельефом поверхности дна; 3) покмарки развиты на участках, где присутствует мощный (30-40 м и более) чехол стратифицированных морских осадков.

Полигон №2 расположен в юго-западной части Карского шельфа к северо-западу от о. Белый, глубины составляют от 50-60 до 250-260 м. На дне обнаружена часть крупной подводной долины, простирающейся с севера на юг (рис. 4), в средней части полигона в долину впадает ее приток.

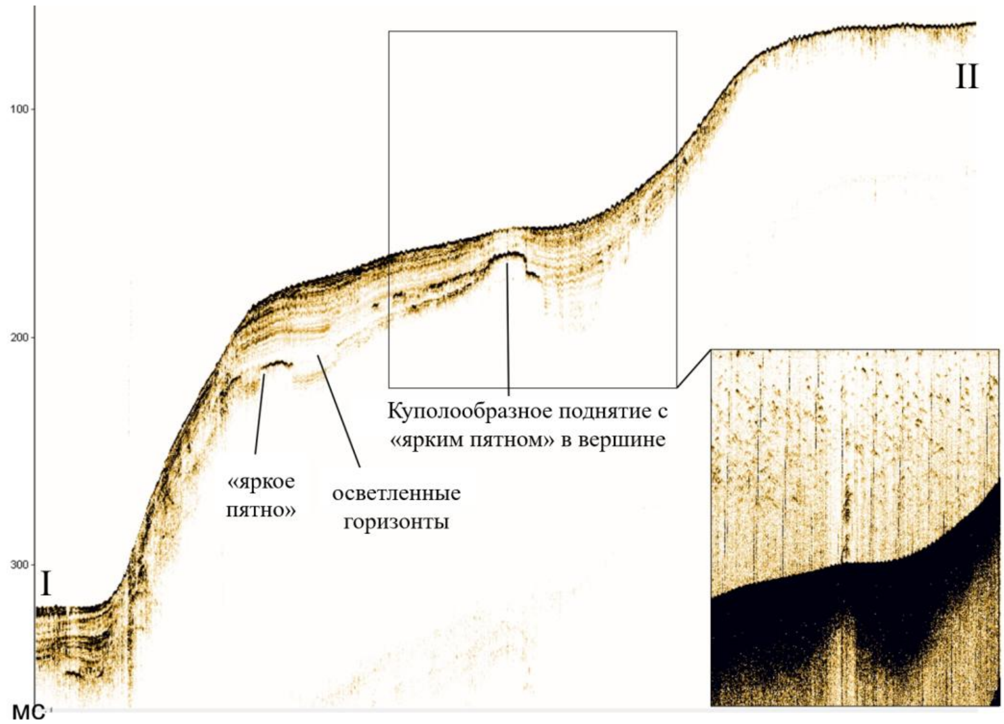

Рис.5. Акустические аномалии типа «яркое пятно» и куполообразные поднятия газового фронта на терассовидных поверхностях долины (Карское море) на сейсмоакустическом профиле по линии I-II. На врезке газовые факелы (фрагмент разреза с усилением)

Ширина долины по бровкам изменяется от 2700 м до 6500 м. В днище ее фиксируются замкнутые понижения с относительной глубиной до 20 м. Поперечный профиль долины асимметричный – западный борт имеет крутизну до 15-20°, восточный – в среднем 5-7°, местами до 20°. На восточном склоне наблюдается хорошо выраженная ступень относительной высотой около 100 м над тальвегом долины. Рельеф ее достаточно расчлененный (перепады глубин до 30-50 м), в северной части полигона данная псевдотерраса осложнена грядой в прибровочной части и соседствующей с ней ложбиной. По данным сейсмоакустического профилирования в днище долины и на поверхности псевдотеррасы залегают стратифицированные морские осадки мощностью от 5 до 15 м (рис. 5), в центральной части днища – до 50 м. По характеру залегания сейсмофации имеют параллельный рисунок на склонах, облекая неровности более древнего рельефа. В днище долины наблюдается расходящийся тип сейсмофаций (раздув мощности слоев), а также перекрывание разновозрастных генераций осадочных толщ в основании склонов. Акустические аномалии, связанные с процессами дегазации, остановлены в верхней части осадочного разреза и в самой водной толще. В частности, в слоистых морских осадках четко выражены акустические аномалии типа «яркое пятно» и «плоское пятно», которые распространены преимущественно на поверхности псевдотеррасы и в днище долины. В осадочных горизонтах, заполняющих дно, рефлекторы с усиленным отражением располагаются на различных уровнях ниже поверхности дна и имеют горизонтальный характер в разрезе. В толще отложений, перекрывающей поверхность псевдотеррасы, выделяются куполообразные аномалии с «яркими пятнами» в вершине (рис. 5), коррелирующие с практически не выраженными поднятиями поверхности дна. Над этими куполами выделяются участки акустического осветления, которые соответствуют зонам прорыва газового фронта в придонных рефлекторах. На склонах долины акустические аномалии имеют прерывистый характер и, в целом, их наклон повторяет профиль склона. На акустическом профиле с применением программного усиления обнаруживаются вертикальные участки повышенной акустической мутности придонной водной толщи (сфокусированные, факелообразные), что, по-видимому, является результатом взмучивания поверхности дна при дегазации (Рис. 5, врезка). При этом в рельефе поверхности дна флюидогенные формы не обнаружены, признаки дегазации присутствуют исключительно на разрезах.

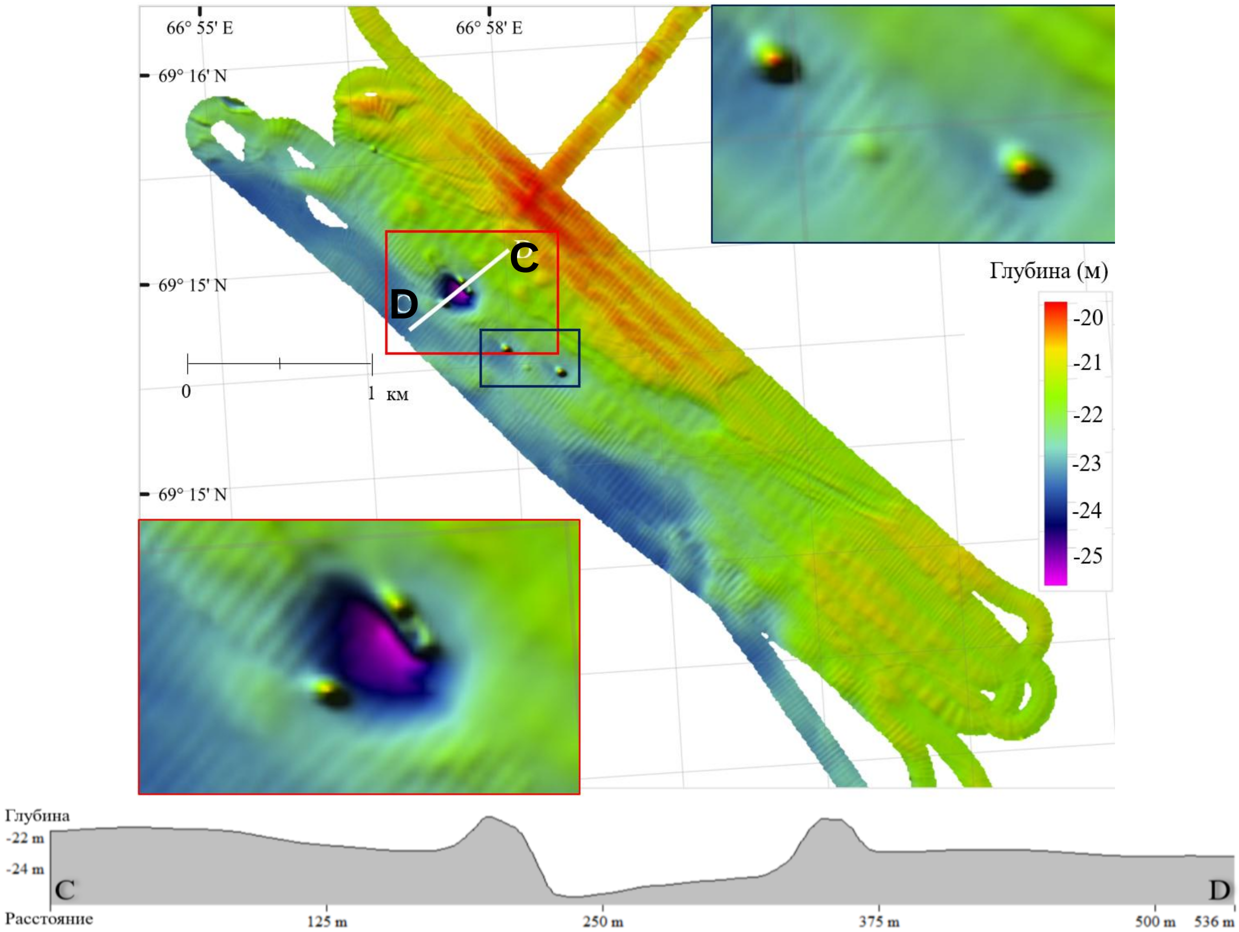

Рис. 6. Цифровая модель рельефа дна на полигоне №4 и батиметрические профили по линии C-D

Таким образом, в пределах полигона №2 установлено достаточно широкое развитие процессов дегазации, фиксирующееся положением акустических аномалий в рыхлых морских осадках, залегающих на разных формах и элементах рельефа дна. Установлены следующие закономерности: 1) процессы дегазации протекают в условиях разной мощности осадочного чехла и разных геоморфологических позициях; 2) газонасыщенность фиксируется в разрезе акустическими аномалиями типа «плоское пятно», «яркое пятно», участками акустического осветления, а также в самой водной толще в виде сфокусированных факелообразных участков повышенной мутности воды; 3) флюидогенный рельеф (покмарки) на участках дегазации не выражен.

Полигон №3 расположен в центральной части Байдарацкой губы Карского моря, глубины составляют 19-26 м (Рис. 6). Восточная часть полигона относительно мелководная (средние отметки глубин 19-22 метра), западная – более погруженная, с глубинами до 25 м. Рельеф дна ступенчато понижается с северо-востока на юго-запад. Верхняя часть осадочного разреза имеет сложное строение, в частности, стратификация донных осадков здесь практически не выражена, по-видимому, из-за их высокой латеральной литологической изменчивости (Рис. 7). Кроме того, в разрезе присутствуют участки акустического осветления, фиксирующие газонасыщенность осадка. Подошва рыхлого осадка имеет неровный рельеф, возможно, связанный с положением кровли многолетней мерзлоты, имеющей островное распространение и мощность порядка 50 м в данной части шельфа [*Перлова, 2017*].

В центральной части полигона обнаружены несколько положительных, изометричных в плане форм высотой 3-4 м, до 40-45 м в поперечнике, с симметричными склонами крутизной 8-10˚. Вокруг каждой из этих положительных форм наблюдаются периферийные концентрические понижения относительной глубиной до 0,5 м (рис. 6, врезки и профиль). Три из зафиксированных форм ограничивают изометричное в плане, замкнутое понижение глубиной до 2 м и около 100 м в поперечнике. В днище его залегает стратифицированный осадок с нарушенной, наклонной слоистостью. С использованием программного усиления (Рис. 7 – врезка) выявлены скопления газовых пузырей в водной толщи непосредственно над пингоподобными поднятиями, что может являться признаком дегазации. В то же время, для данной мелководной части шельфа возможно фоновое увеличение мутности придонного слоя в результате воздействия волнения. Анализируя сейсмоакустические данные установить генезис положительного микрорельефа в данной части шельфа довольно проблематично. Установленные формы могут представлять собой бугры криогенного происхождения, а изометричное понижение глубиной до 2 м – термокарстовую западину. В то же время, рыхлые осадки, слагающие дно, являются газонасыщенными (о чем свидетельствует наличие участков осветления) и положительные пингообразные (по [*Paull et al., 2007*]) формы могут являться результатом выдавливания флюидоупора с деформацией поверхности дна.

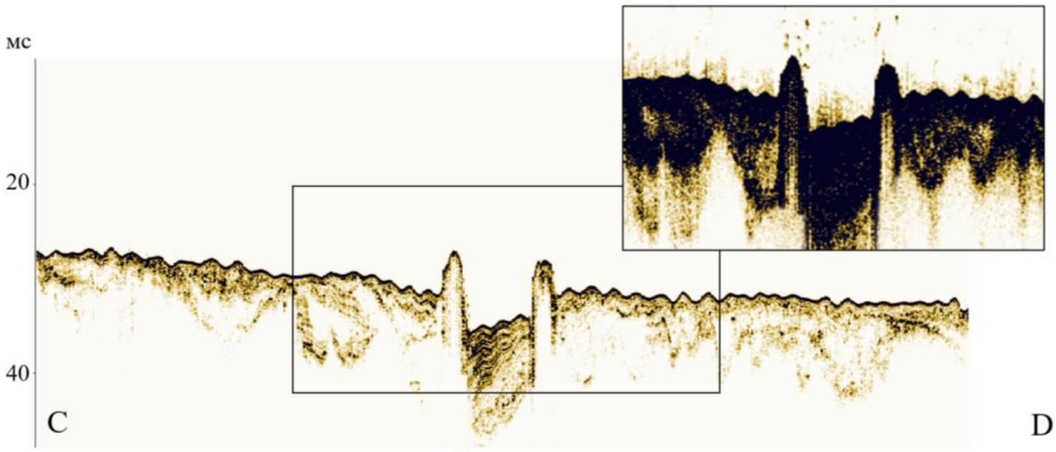

Рис. 7. Сейсмоакустический профиль по линии C-D
(положение профиля показано на рис. 6)

Таким образом, в центральной части Байдарацкой губы обнаружены признаки газонасыщения рыхлых осадков, однако рельефообразующая роль процесса дегазации по имеющимся данным не может быть показана однозначно. Многолетняя мерзлота на шельфе является флюидоупором, однако там, где она имеет небольшую мощность и породы являются пластичномерзлыми, можно предположить выдавливание их к поверхности в результате сфокусированного поступления газа.

Результаты исследования строения осадочной толщи и рельефа дна в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа и в юго-западной части Карского шельфа позволяют заключить следующее:

1. Участки дегазации фиксируются в строении осадочного чехла в виде акустических аномалий типа «плоское пятно», «яркое пятно», в виде локального прогибания рефлекторов и акустического осветления, в водной толще – в виде сфокусированных факелообразных или площадных участков повышенной акустической мутности водной толщи.

2. Рельефообразующая роль дегазации проявляется не повсеместно, в частности, покмарки (газовые грифоны) наиболее характерны для участков с повышенной мощностью хорошо стратифицированных морских осадков. На значительных пространствах дна шельфа дегазация не приводит к образованию специфического микрорельефа, а выражена лишь на сейсморазрезах в виде акустических аномалий.

3. На изученных участках дна установлена связь между фоновым рельефом дна и ориентацией ареалов покмарок, в частности, увеличение их плотности фиксируется в днищах линейно вытянутых понижений и на перегибах донного рельефа.

Исследования выполнены по научной теме ГИН РАН «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами» (№0135-2019-0076), по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 3, а также теме госзадания кафедры геоморфологии и палеогеографии МГУ имени М.В. Ломоносова (№121040100323-5).

ЛИТЕРАТУРА

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.

Мазарович А.О. Тектоника и геоморфология Мирового океана: Термины и определения с иллюстрациями / Отв. ред. Н.В. Межеловский. М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2018. 440 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. Москва, 2020. С. 37–43.

Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д., Сухих Е.А., Ананьев Р.А., Разумовский А.А., Левченко О.В. Проявление дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 91-96. doi:10.31857/S268673972108017X

Перлова Е.В., Микляева Е.С., Леонова С.А., Ткачёв Е.В., Ухова Ю.А. Газовые гидраты полуострова Ямал и прилегающего шельфа Карского моря как осложняющий фактор освоения региона // Вести газовой науки. 2017. №3. С. 255-262

Judd A., Hovland M. Seabed fluid flow – impact on geology, biology and the marine environment. Cambridge University Press. Cambridge. 2007. 400 p.

Paull C. K. 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, doi:10.1029/2006GL027977.

Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // J. Geophys. Res. Earth Surf., 2015, 120, 1515–1529, doi:10.1002/ 2015JF003467.

GEOMORPHOLOGICAL ROLE OF DEGASSING ON THE BARENTS-KARA SHELF

[1]Eremenko E.A., [1]Denisova A.P., [2]Moroz E.A., [1]Maznev S.V., [3]Arkhipov V.V.

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; eremenkoeaig@gmail.com
[2] Geological Institute RAS, Moscow, Russia
[3] N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

Based on the results of multibeam survey and high-frequency seismic profiling performed in 2021 during the 52nd cruise of the R/V «Akademik Nikolaj Strakhov», a widespread degassing process was established in the southeastern part of the Barents Sea and southwestern part of the Kara shelf. The nature of the manifestation of degassing processes in the section of the sedimentary strata at the bottom is analyzed. Degassing areas are recorded in the structure of the sedimentary cover in the form of acoustic clarification and anomalies of the “flat spot” type, “bright spot”, in the form of local deflection of reflectors, in the water column - in the form of gas flares or areal areas of increased acoustic turbidity of the water column. The geomorphological role of degassing is not manifested everywhere, in particular, pockmarks are most typical for areas with an increased thickness of well-stratified marine sediments. In large areas of the shelf bottom degassing does not lead to the formation of a specific landforms, but is expressed only on seismic sections in the form of acoustic anomalies. On the studied bottom areas, a relationship was established between the background bottom topography and the orientation of the pockmark areas, in particular, an increase in their density is recorded in the bottoms of linearly elongated depressions and on the folds of the bottom topography.

Keywords: *shelf, degassing, pockmarks, acoustic anomalies, Barents shelf, Kara shelf*