

ПРИЗНАКИ ДЕГАЗАЦИИ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕДНИКОВОГО И ВОДНО-ЛЕДНИКОВОГО РЕЛЬЕФА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВОМОРСКОГО ШЕЛЬФА

^{1,2}Денисова А.П., ¹Мороз Е.А., ^{1,2}Еременко Е.А., ¹Сухих Е.А., ³Архипов В.В.

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

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

³Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Москва, Россия

По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненных осенью 2022 года в рамках 51 рейса НИС «Академик Борис Петров», в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа было выявлено широкое распространение форм ледникового и водно-ледникового рельефа. Ледниковый рельеф представлен моренными грядами и мегамасштабной ледниковой линейностью. Среди форм водно-ледникового происхождения выделяются озы, ложбины стока талых ледниковых вод и зандровые равнины. На участках исследования также были выявлены формы ледовой экзарации, как современные, так и реликтовые. Реликтовые борозды ледового выпахивания были зафиксированы на глубинах до 340 м. Признаки дегазации в рельефе выражены в виде изометричных покмарок диаметром 70-80 м и глубиной 4-5 м. Некоторые покмарки собраны в цепочки по 4-5 штук. По сейсмоакустическим данным были выявлены акустические аномалии, свидетельствующие о подъеме флюидов. В верхней части осадочного разреза они представлены яркими пятнами и акустическим осветлением, в водной толще – корневыми и бескорневыми газовыми факелами и акустической мутностью. Акустические аномалии и флюидогенные формы приурочены к областям распространения водно-ледникового рельефа, что связано с достаточной проницаемостью флювиогляциальных отложений алевритового и пелито-алевритового состав.

Ключевые слова: *плато Литке, многолучевая батиметрическая съемка, сейсмоакустическое профилирование, дегазация, акустические аномалии, покмарки*

Введение и методы исследования. Шельф Баренцева моря неоднократно перекрывался покровным ледником в среднем и позднем плейстоцене [Svendsen *et al.*, 2004, Vorren *et al.*, 2011]. Образованный на разных стадиях оледенений ледниковый и водно-ледниковый рельеф (моренные гряды, мегамасштабная ледниковая линейность, друмлины, роген-морены, камы, озы, подледниковые каналы и пр.) охарактеризован в многочисленных публикациях [Миронюк, Иванова, 2018, Svendsen *et al.*, 2004; Гусев и др., 2012; Batchelor *et al.*, 2018; Kurjanski *et al.*, 2019; и др.]. В настоящее время рельеф Баренцевоморского шельфа развивается под действием комплекса экзогенных процессов (аккумуляция морских осадков, склоновые и ледовые процессы, деятельность придонных течений) и дегазации, представляющей собой процесс поднятия флюидов (органического, неорганического и газогидратного происхождения) вверх по разрезу осадочного чехла и в водную толщу [Judd, Howland, 2007]. Работы, посвященные признакам дегазации на Баренцево-Карском шельфе также многочисленны [Judd, Howland, 2007; Захаренко и др., 2014; Chand *et al.*, 2016; Миронюк, Росляков, 2019; Еременко и др., 2021 и пр.], при этом в них нередко подчеркивается, что ледниковые отложения могут играть роль флюидоупора, препятствуя проникновению флюидов к поверхности дна. Целью выполненных работ являлось выявление признаков дегазации в районах распространения ледниковых и водно-ледниковых форм и отложений в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа, изучение основных черт их распространения и связи с геолого-геоморфологическими условиями.

Исследования основаны на результатах геофизических работ, выполненных в 51 рейсе НИС «Академик Борис Петров» в Баренцево-Карском регионе в сентябре 2022 года. Многолучевая батиметрическая съемка проводилась с помощью эхолота Seabat T50-ER с частотой сигнала 200 кГц. Исследование верхней части осадочного чехла осуществлялось

с использованием профилографа Parasound P70, который позволяет снимать в двух режимах: на низких 7 кГц (для осадочной толщи) и высоких 17,5 кГц (для водной толщи) частотах. Работы проводились в пределах ключевых полигонов на параллельных галсах с эффективным перекрытием между ними около 20% (после удаления краевых некондиционных отскоков). Обработка данных многолучевой батиметрической съемки проводилась операторами вручную в программном пакете PDS V3.4.7.1. На сейсмоакустических профилях выделялись акустические аномалии, связанные с газонасыщением верхней части осадочного разреза, а также с подъемом флюидов в водную толщу. Для изучения проявлений дегазации в пределах северной окраины Баренцево-Карского шельфа было выбрано два ключевых полигона (Рис. 1).

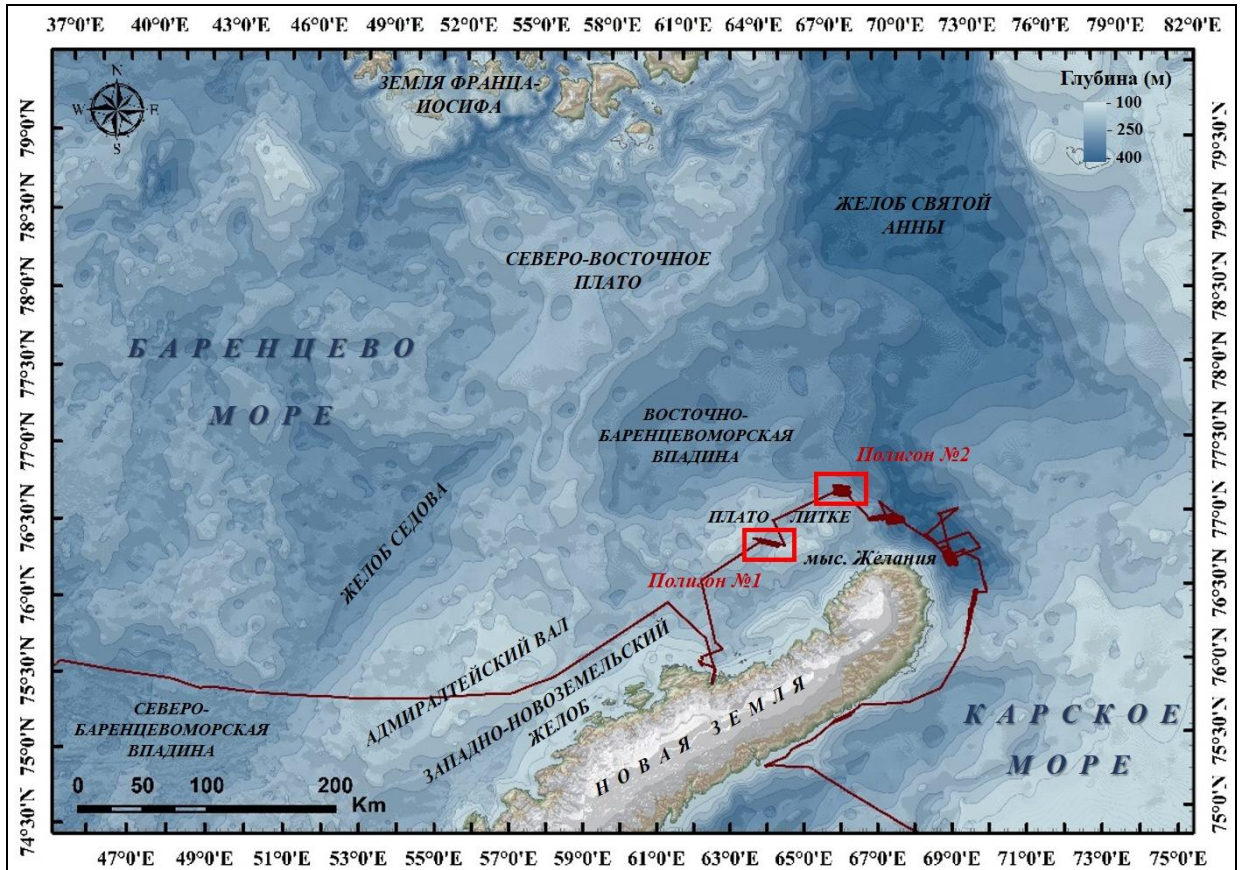


Рис.1. Местоположение полигонов исследования (топографическая основа – по данным GEBCO-2020, <https://www.gebco.net>). Линией показан маршрут 51 рейса НИС «Академик Борис Петров» в сентябре 2022 г.

Результаты работ. Полигон №1 расположен в пределах плато Литке в 90 км к ЗСЗ от мыса Желания и в 320 км к Ю от архипелага Земля Франца-Иосифа. Глубины в пределах полигона изменяются от 91 м до 219 м (Рис. 2). В рельефе дна выделяются четыре высотных уровня. Наиболее возвышенными являются западная (глубины от 91 до 130 м) и восточная (глубины от 130 до 160 м) части полигона. Они представляют собой фоновую мелкобугристую поверхность, прорезаемую отрицательной формой (предположительно, ложбиной стока талых ледниковых вод). Наиболее пониженной является центральная часть полигона, которая включает днище ложбины (глубины от 190 до 219 м) с эрозийными останцами относительной высотой 20-30 м, а также и террасовидную поверхность (глубины от 130 до 160 м), ширина которой составляет от 1,5 км (в северной части полигона) до 2,5 км (в южной части). Террасовидная поверхность отделена от западной возвышенной части полигона извилистым каналом относительной глубиной до 24 м. Рельеф его днища – мелкобугристый, ширина по бровкам составляет от

180 м на севере до 430 м на юге полигона (Рис. 2, профиль АВ). Днище ложбины стока талых ледниковых вод осложнено и более мелкими формами эрозионного происхождения (рис. 2, профиль CD).

В западной возвышенной части полигона до глубин 115-120 м распространены борозды ледового выпаживания и изометричные впадины (диаметром 70-90 м) с валом выпирания, образующиеся в результате остановки айсберга и его вращения на месте. Борозды имеют V-образный поперечный профиль. Их глубина составляет 1,5-2 м, а ширина изменяется от 55 до 95 м. На бровках борозд фиксируются бортовые валики высотой до 1,5 м.

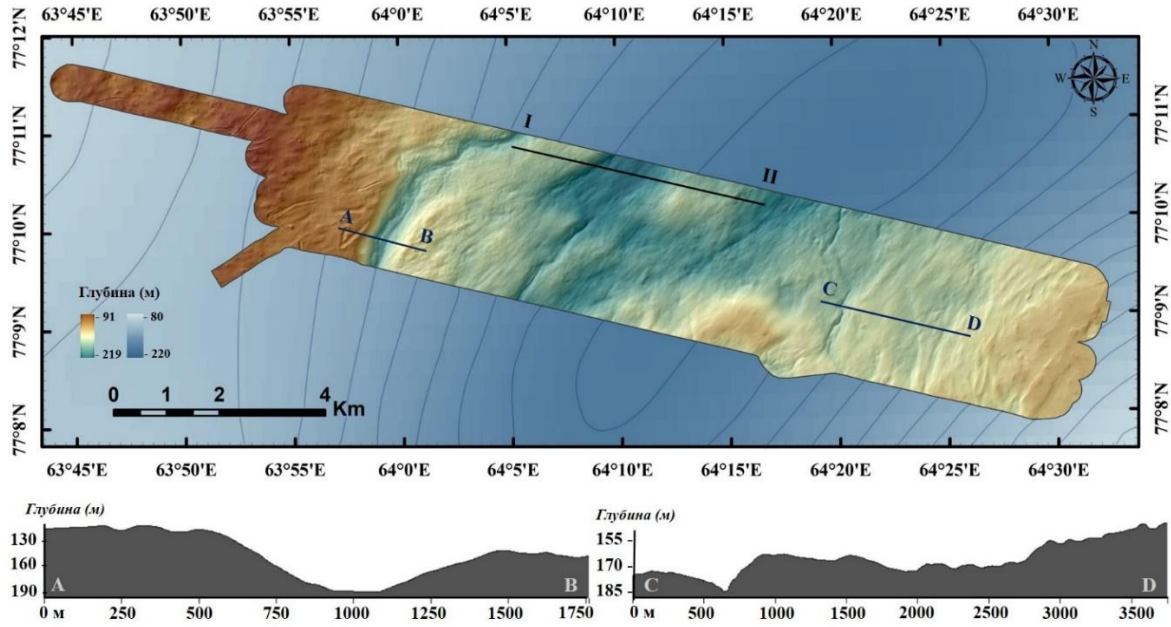


Рис. 2 Цифровая модель рельефа дна полигона №1. АВ, CD – батиметрические профили, I-II – сейсмоакустический разрез (подложка - GEBCO-2020, <https://www.gebco.net> с изобатами, проведенными через 10 м)

Верхняя часть дочетвертичного осадочного чехла в пределах полигона представлена породами триасовой системы – алевролитами и аргиллитами с прослоями песчаников [Шкарубо и др., 2013]. В Западно-Арктическом регионе мезозойские песчаники представляют собой газонасыщенный горизонт, наличие которого является причиной глубинной дегазации. Отметим, что оба изученных полигона расположены в пределах Адмиралтейско-Приновоземельской перспективной нефтегазоносной области [Шкарубо и др., 2013]. Дочетвертичные породы перекрыты ледниковыми, флювиогляциальными и морскими отложениями позднеплейстоцен-голоценового возраста, представленными песчано-алеврито-пелитовыми миктитами с большим количеством гальки, гравия, дресвы и щебня. Мощность четвертичных отложений в данном районе составляет около 10-15 м [Костин, Орго, 2013].

На сейсмоакустических профилях в возвышенных частях в пределах полигона с поверхности вскрывается горизонт с хаотической неупорядоченной акустической структурой, без протяженных отражающих рефлекторов, представляющий собой, предположительно, ледниковые и ледниково-морские отложения позднеплейстоценового возраста. В центральной части полигона под маломощными (до 7-10 м) акустически прозрачными супесчаными морскими осадками залегает горизонт с нечетко выраженной ритмичной слоистостью. Данный горизонт, вероятно, сложен флювиогляциальными отложениями, а ритмичная запись связана с пульсационным таянием ледниковых массивов. В данном горизонте отмечаются акустические аномалии, свидетельствующие о газонасыщенности осадка (акустическое осветление, которое отображается в виде резкой

потери акустического сигнала в пределах слоистой толщи, и яркие пятна, свидетельствующие о наличии локального флюидоупора) (Рис. 3). Акустические аномалии в воде выражены в виде акустической мутности и газовых факелов и приурочены к пониженной центральной части полигона.

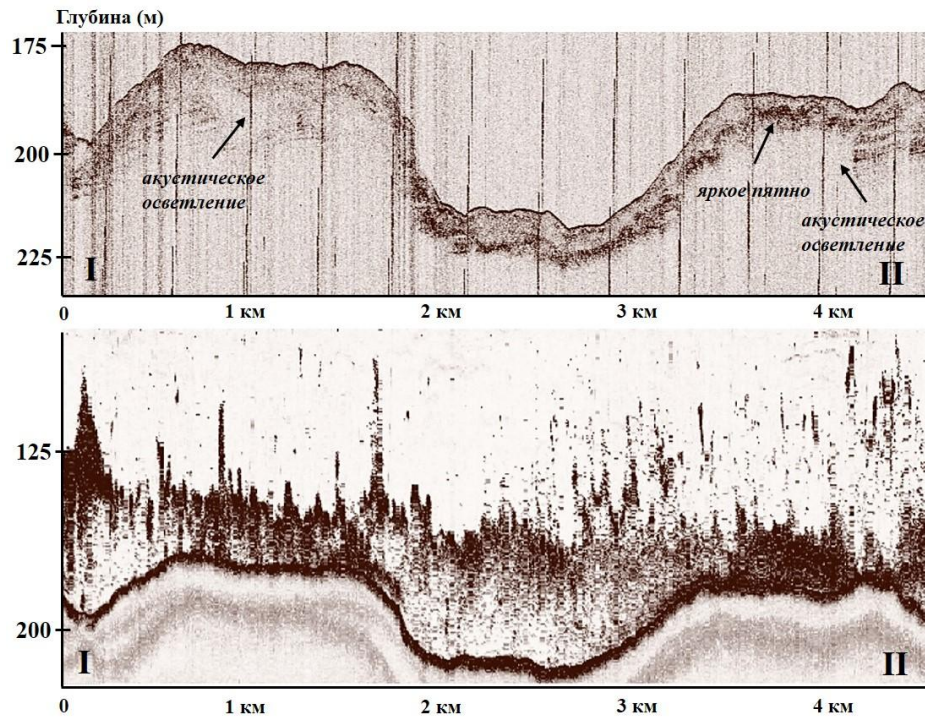


Рис. 3. Сейсмоакустический разрез верхней части осадочного чехла (сверху) и водной толщи (снизу) по линии I-II (рис. 2).

В ходе рейса была предпринята попытки полусуточного мониторинга дегазации, для чего был выполнен проход по одному и тому же галсу в первой и во второй половине дня. В утреннее время на сейсмоакустическом профиле в центре южной части полигона на фоне общей акустической мутности зафиксированы четко выраженные вертикальные аномалии высотой до 120 м, в то время как в вечернее время акустическая картина была совершенно иной, – зафиксирована лишь фоновая акустическая мутность с меньшими амплитудами отраженного сигнала (меньшая яркость), при этом каких-либо сфокусированных вертикальных аномалий не выделено. Установленное изменение облика акустических аномалий в воде может быть связано с деятельностью придонных течений, суточными процессами стратификации в водной толще и требует дальнейшего изучения.

Полигон №2 расположен на восточном склоне плато Литке в 60 км к ССЗ от мыса Желания и в 57 км к СВ от полигона №1. Глубины в пределах полигона изменяются от 241 м до 364 м (Рис. 4). В строении рельефа можно выделить три высотных уровня. Наиболее возвышенный участок расположен с юго-западной части полигона на глубинах от 241 м до 280 м и представляет собой крупную моренную гряду высотой до 40 м, осложненную мегамасштабной ледниковой линейностью более поздней стадии оледенения (предположительно, поздневалдайского), ориентированной субмеридионально (Рис. 4, профиль АВ). Второй высотной уровень фиксируется на глубинах от 280 м до 300 м и представлен моренными грядами с меньшей относительной высотой (до 25 м). Поверхность в пределах всей северной части и на большей части восточного участка полигона относится к третьему высотному уровню с глубинами от 300 до 364 м. Рельеф ее представляет собой задровую равнину, осложненную извилистыми в плане аккумулятивными грядами, ориентированными с СВ на ЮЗ. Судя по морфологии данные формы представляют собой озы длиной около 1 км, шириной около 100 м (Рис. 4, профиль

CD). В северо-восточной части обнаружен небольшой подледниковый канал шириной 105 м и глубиной 4,5 м.

Поверхность моренных гряд осложнена бороздами ледового выпаживания. Ширина их составляет от 150 м до 190 м, а глубина - 4-5 м. Формы ледового выпаживания распространены и в пониженной части полигона (к примеру, крупная борозда зафиксирована на глубине 338 м). Эти формы, по-видимому, являются реликтовыми и могут присутствовать и на больших глубинах (до 380 м) [Миронюк, Иванова, 2018].

На отдельных участках в пределах зандровой долины установлено наличие флюидогенного рельефа (Рис. 5). Так, в юго-западной части на глубинах 300-320 м фиксируется группа (13 шт.) изометричных покмарок диаметром от 45 м до 70-80 м и глубиной от 1 м до 4-5 м. Поперечный профиль их симметричный, крутизна склонов составляет 7-8° (Рис. 5, а). Покмарки распространены также и в восточной части полигона на глубинах 340-345 м. В этой области они собраны в цепочки по 4-5 штук, которые ориентированы субмеридионально. Их диаметр в среднем составляет 80-85 м. Среди данных покмарок встречаются формы с асимметричным поперечным профилем, крутизна склонов изменяется от 3° до 7,5° (Рис. 5, б). В северо-восточной части на тех же глубинах фиксируются две крупные покмарки глубиной до 6 м и диаметром около 80 м.

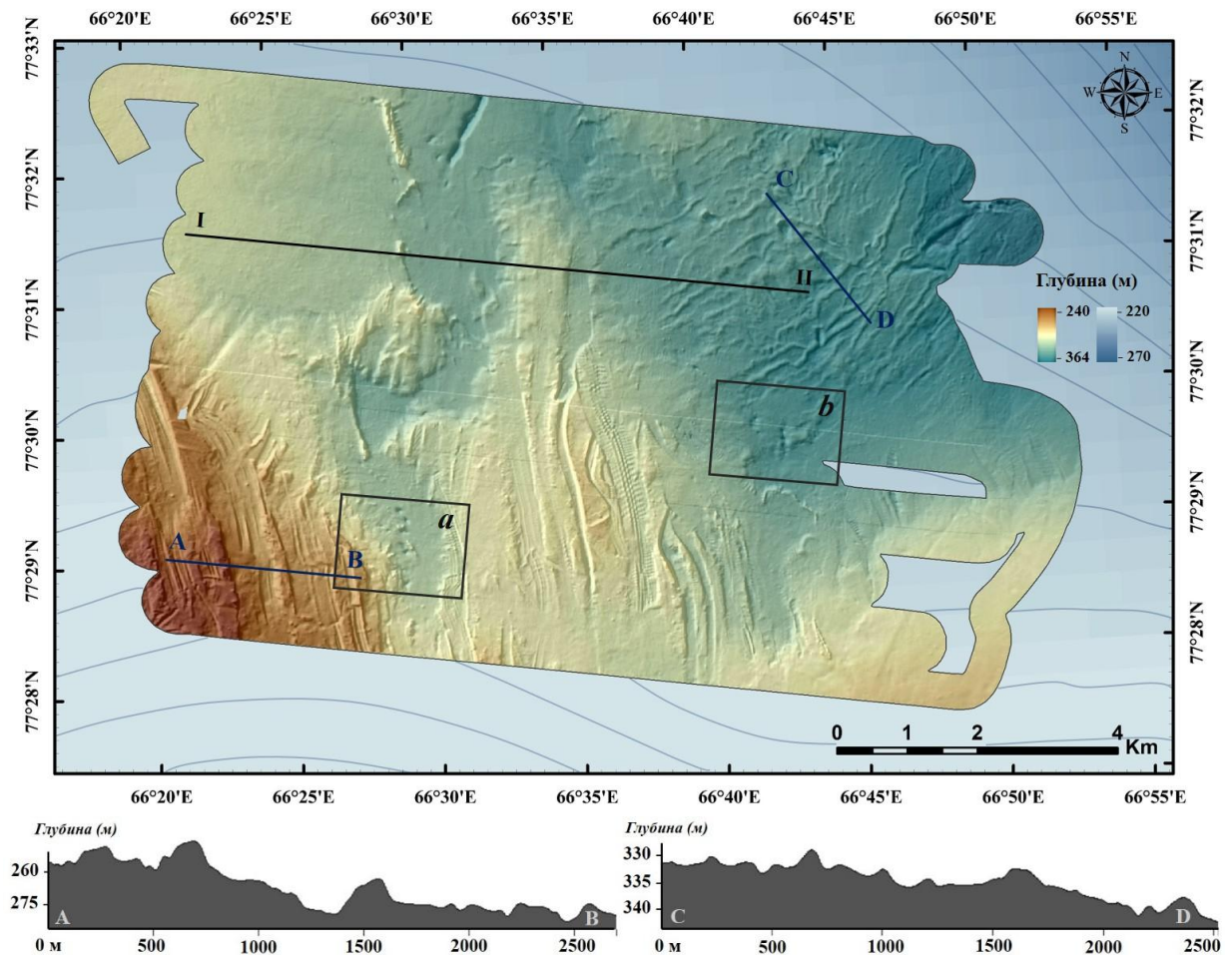


Рис.4. Цифровая модель рельефа дна полигона №2. АВ, CD – батиметрические профили, I-II – сейсмоакустический разрез, а, б, с – участки распространения покмарок, см. рис. 5 (подложка - GEBCO-2020, <https://www.gebco.net> с изобатами, проведенными через 10 м)

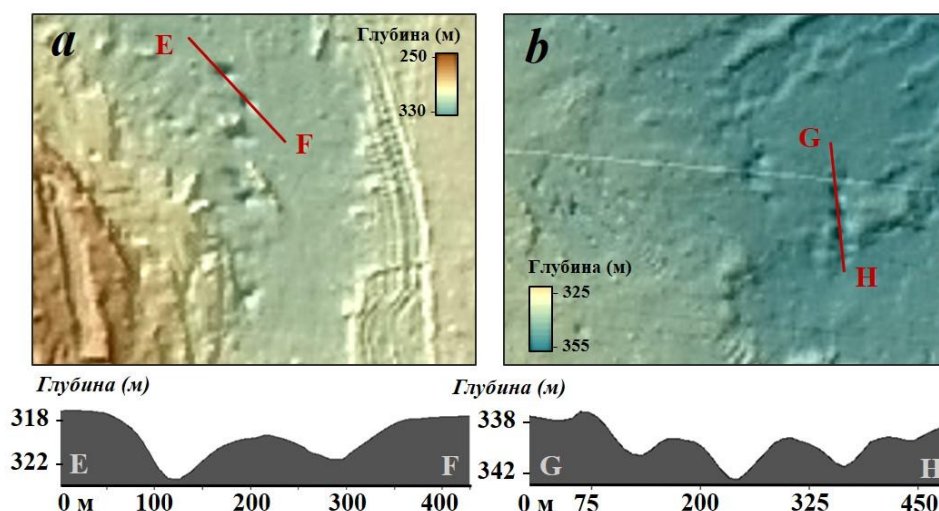


Рис. 5. Участки распространения покмарок на полигоне №2 (положение участков см. на рис. 4). EF, GH – батиметрические профили через наиболее крупные покмарки.

Верхняя часть дочетвертичного комплекса в пределах полигона №2 представлена породами триасовой системы – алевролитами и аргиллитами с прослоями песчаников [Шкарубо и др., 2013]. С поверхности залегают ледниково-морские (на юге полигона) и флювиогляциально-морские (на севере полона) позднеплейстоцен-голоценовые отложения, представленные миктитами, пелитовыми алевритами с включениями крупнообломочного материала. Мощность четвертичных отложений в данной районе составляет около 50 м [Костин, Орго, 2013].

По результатам высокочастотного акустического профилирования в пределах возвышенных частей, представленных, по-видимому, моренными грядами, с поверхности вскрывается горизонт с «хаотической» неупорядоченной акустической структурой, без протяженных отражающих рефлекторов. В области зандровой равнины картина иная. Здесь с поверхности вскрывается толща акустически прозрачных, вероятно, супесчаных осадков мощностью до 20 м, ниже которой залегают ритмично слоистые осадки. Обе эти толщи, предположительно, являются флювиогляциальными образованиями и отвечают разным стадиям дегляциации. В осадочном чехле и в водной толще также, как и в пределах первого полигона, выделяются акустические аномалии, связанные с дегазацией. Среди аномалий в осадочном чехле в основном фиксируются акустическое осветление и яркие пятна (рис. 6). Наибольшее количество ярких пятен приурочено к северной и северо-восточной частям (на участках с маломощной толщей супесчаных осадков). В этих же частях полигона фиксируются покмарки. В водной толще выделяются бескорневые газовые факелы, поднимающиеся до глубины 100 м от поверхности воды, и отдельные скопления газовых пузырей, формирующие акустическую мутность (Рис. 6).

Выводы. Результаты исследования рельефа дна и строения осадочной толщи в северо-восточной части Баренцевоморского шельфа позволяют заключить следующее:

1. В данном районе широко развит ледниковой и водно-ледниковый рельеф, представленный крупными конечными грядами, ложбинами стока талых ледниковых вод и зандровыми равнинами, озами. Поверхности ледниковой и водно-ледниковой происхождения осложняют ледовые и флюидогенные формы.

2. Среди признаков дегазации выделяются флюидогенные формы – изометричные покмарки, которые в основном формируют группы из 4-5 штук, а также акустические аномалии в разрезе осадочной толщи – яркие пятна и акустическое осветление (в верхней части осадочного разреза), акустическая мутность и газовые факелы (в водной толще).

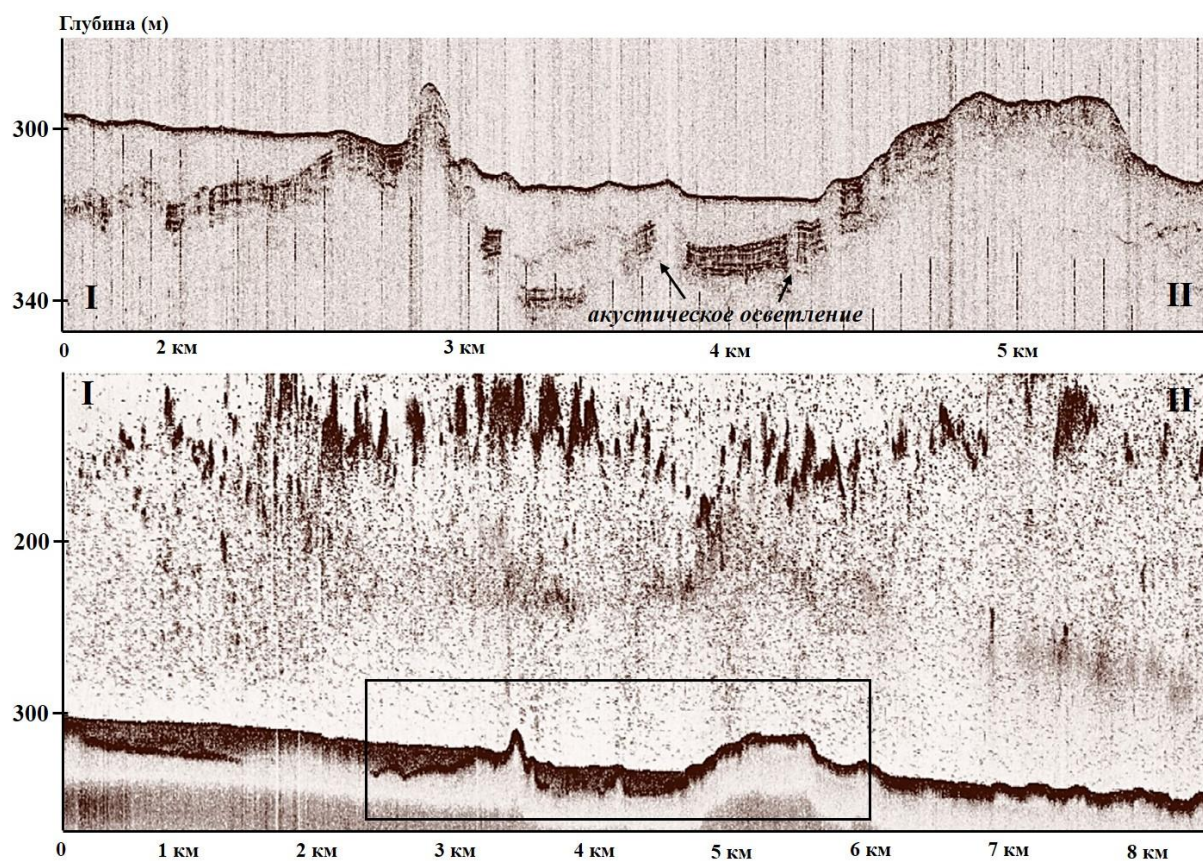


Рис. 6. Сейсмоакустический разрез верхней части осадочного чехла (сверху) и водной толщи (снизу) по линии I-II (положение профиля см. на рис. 4).

3. Акустические аномалии, связанные с дегазацией и флюидогенные формы приурочены, в основном, к областям распространения водно-ледникового рельефа, что связано с достаточной проницаемостью флювиогляциальных отложений, имеющих алевритовый и пелито-алевритовый состав. На участках преобладания пелитов, которые выступают локальными флюидоупорами, признаки дегазации в водной толще практически отсутствуют (выделяются одиночные газовые факелы), в то время как в осадке формируются участки повышенного давления, выраженные в виде ярких пятен.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках госзадания № FMUN-2019-0076 «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами», при поддержке проекта РНФ 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

ЛИТЕРАТУРА

Гусев Е.А., Костин Д.А., Рекант П.В. Проблема генезиса четвертичных образований Баренцево-Карского шельфа (по материалам Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000) // Отечественная геология. 2012. № 2. С. 84-89.

Еременко Е.А., Денисова А.П., Мороз Е.А., Мазнев С.В., Архипов В.В. Рельефообразующая роль дегазации на Баренцево-Карском шельфе // Рельеф и четвертичные образования Арктики, субарктики и северо-запада России. 2021. Выпуск 8. С. 73-81. doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-73-81

Захаренко В.С., Казанин Г.С., Павлов С.П. Предпосылки и условия формирования газогидратов на Штокмановской площади Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 2. С. 394-402.

Костин Д.А., Орго В.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение). Северо-Карско-Баренцевоморская серия. Лист Т-41-44. Карта четвертичных образований. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2013.

Миронюк С.Г., Иванова А.А. Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Баренцева и Красного морей в свете новых данных // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41-58.

Миронюк С.Г., Росляков А.Г. Типы, активность и закономерности распространения покмарок в арктических морях // Сборник тезисов VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». 2019. Т. 2. С. 70-76.

Пенедюк Е.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение). Северо-Карско-Баренцевоморская серия. Лист Т-41-44. Литологическая карта поверхности дна акватории. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2013.

Шкарубо С.И., Орго В.В., Лопатин Б.Г. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (третье поколение). Северо-Карско-Баренцевоморская серия. Лист Т-41-44. Геологическая карта дочетвертичных образований и полезных ископаемых. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ. 2013.

Batchelor C., Dowdeswell J., Ottesen D. Submarine glacial landforms // Submarine Geomorphology. Springer Geology Publ. 2018. P. 207-234. doi: 10.1007/978-3-319-57852-1_12

Chand S., Thorsnes T., Rise L., Brunstad H., Stoddart D. Pockmarks in the SW Barents Sea and their links with iceberg ploughmarks // Geological Society, London, Memoirs. 2016. Vol. 46. №. 1. С. 295-296. doi: 10.1144/M46.23

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

Kurjanski B., Rea B., Spagnolo M., Winsborrow M., Cornwell D., Andreassen K., Howell J. Morphological evidence for marine shutdown, central Barents sea // Marine Geology. 2019. Vol. 414. P. 64-76. doi: 10.1016/j.margeo.2019.05.001

Svendsen J., Alexanderson H., Astakhov V., Demidov I., Dowdeswell J., Funder S., Gataullin V., Henriksen M., Hjort C., Houmark-Nielsen M., Hubberten H., Ingolfsson O., Jakobsson M., Kjær K., Larsen E., Lokrantz H., Lunkka J., Lysa A., Mangerud J., Matiouchkov A., Murray A., Moller P., Niessen F., Nikolskaya O., Polyak L., Saarnisto M., Siegert C., Siegert M., Spielhagen R., Stein R. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. p. 1229-1271. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008

Vorren T., Landvik J., Andreassen K., Laberg J. Glacial history of the Barents sea region // In Quaternary glaciations – Extent and chronology. Volume 15 / Edited by Ehlers J., Gibbard P., Hughes P. Amsterdam: Elsevier Publ., 2011. p. 361-373. doi: 10.1016/B978-0-444-53447-7.00027-1

SIGNS OF DEGASSING WITHIN THE GLACIAL SHELF IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE BARENTS SEA

^{1,2}Denisova A.P., ¹Moroz E.A., ^{1,2}Eremenko E.A., ¹Sukhikh E.A., ³Arkhipov V.V.

¹ Geological Institute RAS, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, 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 51st cruise of the R/V " Akademik Boris Petrov", a widespread of glacial and glacialfluvial landforms was revealed in the northeastern part of the Barents Sea shelf. Glacial relief is represented by moraine ridges and megascale glacial linearity. Among the forms of Glacialfluvial

relief is represented by eskers, hollows of runoff of thawed glacial waters and zander plains. Forms of ice exaration (modern and relict), were also identified at the study region. Relict iceberg ploughmarks were recorded at depths of 340 m. Signs of degassing in the relief are expressed in the form of orbbed pockmarks with a diameter of 70-80 m and a depth of 4-5 m. Some pockmarks are collected in chains of 4-5 pieces. Acoustic anomalies were detected on seismic profiles, which indicate the rise of fluids. In the upper part of the sedimentary cover, they are represented by bright spots and acoustic blanking, in the water column – by gas flares and areal areas of increased acoustic turbidity. Acoustic anomalies and pockmarks are confined to the areas of range of the glacialfluvial landforms, which is associated with sufficient permeability of fluvioglacial deposits having aleurite and pelitic-aleurite composition.

Keywords: *Litke Plateau, multibeam bathymetric survey, high-frequency seismic profiling, degassing, acoustic anomalies, pockmarks*