

НОВАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЕ В КАРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

В. И. Богоявленский¹, А. В. Кишанков¹, А. Г. Казанин², С. И. Рокос³

¹ Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

² АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

³ АО «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2025 г.

Для цитирования

Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г., Рокос С. И. Новая информация о субаквальной мерзлоте в Карском море по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 4. — С. 480—494. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-480-494.

Впервые для площади 620 тыс. км² Карского моря проведены обработка и комплексный анализ большого объема записей первых вступлений преломленных волн сейсмограмм общего пункта взрыва по 74 сейсмопрофилям методом общей глубинной точки (МОГТ) АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» общей протяженностью около 11,5 тыс. км. Обосновано, что в наиболее хорошо изученном Южно-Карском бассейне в основном процесс деградации субаквальных реликтовых многолетнемерзлых пород (ММП) завершился. При этом на 174 обособленных участках сохранилась островная мерзлота с разным уровнем цементации льдом. Эти данные согласуются с ранее сделанными специалистами АО «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» выводами на основе бурения инженерно-геологических скважин. Для недостаточно изученного Северо-Карского бассейна получена принципиально новая информация о полном отсутствии реликтовых ММП, что кардинально отличается от всех других результатов исследований, в основном базирующихся на данных математического моделирования. Выдвинута гипотеза о возможных причинах сохранения островной мерзлоты в Южно-Карском бассейне.

Ключевые слова: Арктика, Карское море, сейсморазведка МОГТ, преломленные волны, многолетнемерзлые породы (ММП), островная мерзлота, газовые гидраты.

Введение

В 2020—2025 гг. авторами выполнен широкий комплекс исследований, направленных на изучение состояния субаквальной криолитозоны на арктическом шельфе Восточной Сибири (АШВС — моря Лаптевых и Восточно-Сибирское) в пределах развития многолетнемерзлых пород (ММП), образовавшихся в последний гляциальный период в субэкральных условиях на месте современного мелководного шельфа (примерно до изобат 120 м) [1—6]. Проведенные на АШВС исследования базируются на анализе скоростей распространения преломленных волн, содержащихся в начальных частях (первые вступления) сейсмограмм общего пункта

взрыва/возбуждения (ОПВ) упругих колебаний, зарегистрированных при проведении стандартной нефтегазописковой сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) по 176 сейсмопрофилям общей протяженностью более 34 тыс. км АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ), а также дочерних предприятий АО «Росгеология» АО «Севморнефтегеофизика» (СМНГ) и АО «Дальморнефтегеофизика» (ДМНГ).

В итоге исследований около 1,3 млн км² АШВС установлено, что в постгляциальный период на затопленной территории суши Восточной Сибири происходила неравномерная деградация ММП под действием ряда факторов, включая тепловой поток Земли, экранированное морем поступление арктического холода и подводные течения. При этом выявлена граница распространения мерзлых пород

на АШВС и «...получена новая информация о состоянии субаквальной криолитозоны, кардинально отличающаяся от всех предыдущих данных. Впервые установлено, что на большей части АШВС (57,6%, 737 тыс. км²) мерзлые породы полностью деградировали, что также сократило площадь возможного существования газогидратов. При этом в наибольшей степени мерзлота деградировала на шельфе Восточно-Сибирского моря (76,9%, 665 тыс. км²)» [6; 7, с. 210—211]. Полученные результаты вызвали удивление и/или даже сомнение у некоторых мерзлотоведов [8]. Однако их достоверность не вызывает сомнений у геофизиков и подтверждается данными бурения ряда скважин, включая ПАО «НК «Роснефть».

В наших работах понятие «многолетнемерзлые породы» регламентируется государственными стандартами, включая ГОСТ 25100—2011 [9], классифицирующий различные состояния грунтов, согласно которому к грунтам относятся «любые горные породы, почвы, осадки и техногенные образования... как часть геологической среды». При этом мерзлым считается «...грунт, имеющий отрицательную или нулевую температуру, содержащий в своем составе видимые ледяные включения и/или лед-цемент и характеризующийся криогенными структурными связями. Многолетнемерзлый грунт — грунт, находящийся в мерзлом состоянии постоянно в течение трех и более лет. Сезонномерзлый грунт — грунт, находящийся в мерзлом состоянии периодически в течение холодного сезона» [9].

Основной целью исследований в данной статье является расширение региона исследований состояния реликтовых субаквальных ММП с сопутствующими им газогидратами на регион Карского моря. При этом, как и на акваториях АШВС, исследования базируются на анализе архивных записей преломленных волн, полученных при проведении сейсморазведки МОГТ МАГЭ, с дополнениями результатами бурения скважин АО «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (АМИГЭ) — дочернего предприятия АО «Росгеология» [10—13].

Методы и материалы исследований

Как мы уже неоднократно отмечали и показали на большом объеме данных традиционной (архивной и новейшей) сейсморазведки методом МОГТ, необходимая информация о наличии или отсутствии ММП может быть получена по регистрируемым преломленным волнам в первых вступлениях сейсмограмм общего пункта взрыва (ОПВ — общий пункт возбуждения упругих колебаний пневмоисточником) [1—6]. При традиционном графе обработки записей отраженных волн МОГТ преломленные волны являются помехами, автоматически срезаются мьютингом и удаляются из дальнейшего графа обработки.

Специфика распространения преломленных волн в субгоризонтальном направлении вдоль пластов делает их уникальным инструментом анализа физических характеристик отложений, которые в мерз-

лом состоянии (разный уровень цементации льдом) имеют значительно большие скорости распространения упругих колебаний (до 1,5—2,7 раз [1—6; 14]), чем слабо консолидированные породы в талом состоянии. Согласно обобщению ряда работ по физическому моделированию различных пород с пресной водой [15], при температурах около –5°C наибольшими скоростями 3,8—4,7 км/с обладают мерзлые песчаники, а глинистые отложения характеризуются несколько меньшими скоростями — в основном до 2,8—3,5 км/с.

При исследованиях субаквальных ММП на Северном склоне Аляски в море Бофорта [14] были выделены два интервала скоростей преломленных волн: 2,3—2,8 и 2,8—4,5 км/с, характеризующих льдонасыщенные отложения с разным уровнем цементации (ice-bonded permafrost), что было обосновано данными бурения на суше и шельфе. Эти значения скоростей мы использовали для унификации результатов по АШВС [1—6] и в настоящей работе. Кроме того, в процессе работы мы заметили, что во многих случаях целевые преломленные волны от ММП прослеживаются и на скоростях менее 2,3 км/с вплоть до 1,8—1,9 км/с. В связи с этим мы их также дополнительно учитывали в работе [6] и в настоящем исследовании.

Расчет скоростей распространения преломленных волн по сейсмограммам ОПВ проведен в программном обеспечении (ПО) SeisPro (компания «Деко-геофизика», Россия). Все картографические построения выполнены в ПО ArcGIS (компания ESRI, США). Расчеты площадей прогнозного распространения талых и мерзлых пород на акватории Карского моря выполнены в ПО ArcGIS на основе Общей батиметрической карты океанов GEBCO (Версия 5.1 2025 г., <https://www.gebco.net/>).

Для анализа скоростей преломленных волн в первых вступлениях использовались полевые материалы сейсморазведки МОГТ по 74 сейсмопрофилям в суммарном объеме 11,55 тыс. км (рис. 1, табл. 1), полученные в 1979—2013 гг. МАГЭ. Из этого объема в пределах мелководья до изобаты 120 м оказалось 8555 км, в том числе современных данных МОГТ 2004—2013 гг. высокого качества с числом сейсморегистрирующих каналов 168—648 (см. табл. 1) — 4688 км (54,8%). При этом длины плавающих сейсмоков по 29 сейсмопрофилям общей протяженностью 4206 км менялись от 4,2 до 8,1 км. Максимальные длины баз приема 8,0—9,7 км были при работах по 19 сейсмопрофилям протяженностью 391 км в транзитной зоне западного побережья полуострова Ямал (см. рис. 1 — РYT) с использованием автономных донных станций. Также использовались архивные материалы времен СССР 1979—1987 гг. по 26 сейсмопрофилям в Южно-Карском и Северо-Карском бассейнах и в Обской губе (см. рис. 1 — SK, NK, OB) протяженностью 3867 км (45,2%). Несмотря на то, что длины использованных сейсмоков времен СССР в данной работе составляли всего 1,2 и 2,4 км, и их качество хуже современных, они также позво-

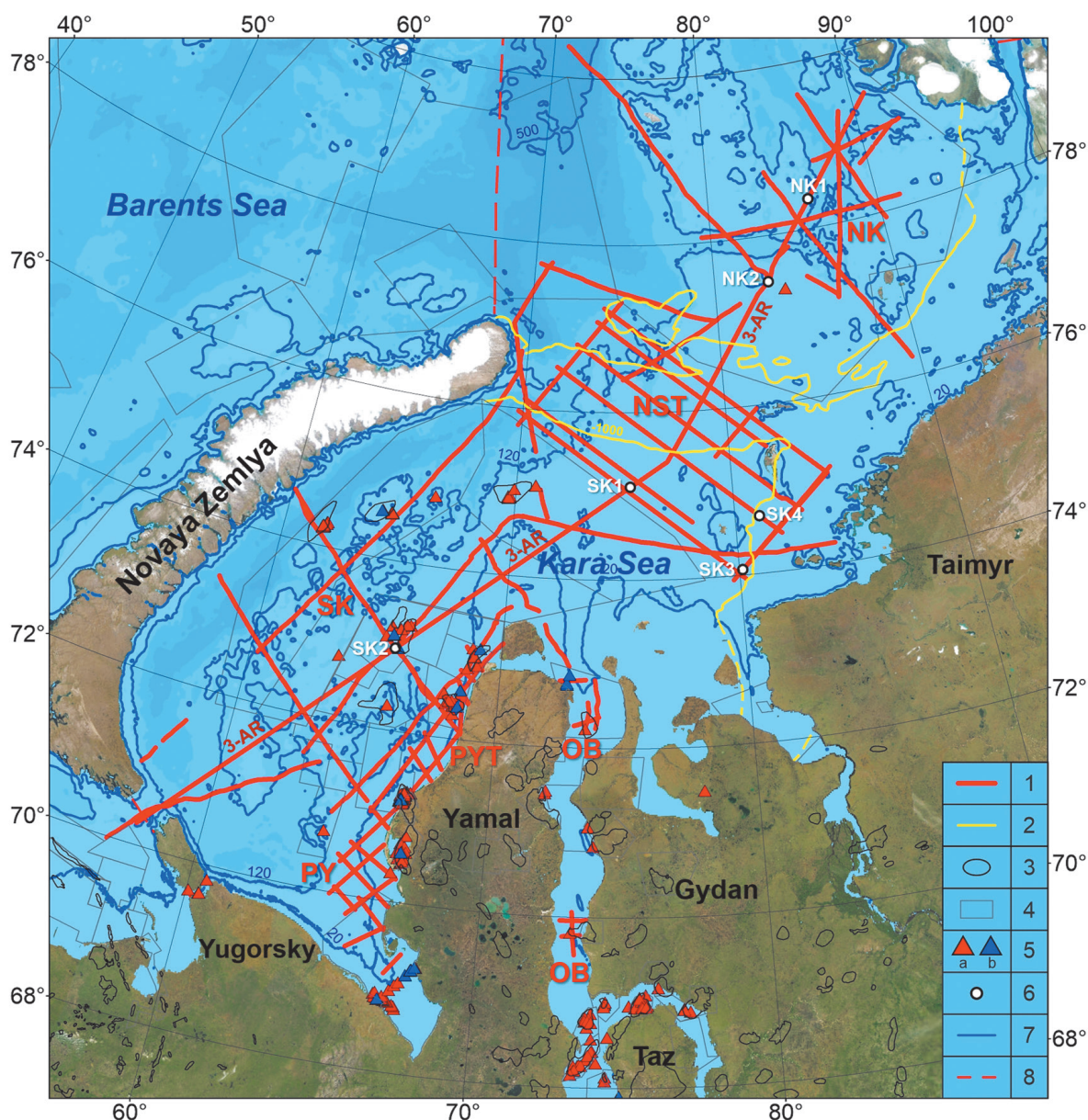


Рис. 1. Схема расположения использованных материалов сейсморазведки МОГТ МАГЭ в Карском море. Обозначения: 1 – сейсмопрофили, 2 – поднятие архейско-протерозойского фундамента по изогипсе –1000 м [17], 3 – месторождения углеводородов, 4 – лицензионные участки, 5 – скважины АО АМИГЭ, не подтвердившие (a) и подтвердившие (b) наличие ММП [10–13], 6 – примеры сейсмограмм ОПВ на рис. 2 и 3, 7 – изобаты в метрах (построены авторами на основе данных GEBCO), 8 – граница Карского моря

Fig. 1. Layout of the used CDP seismic data of JSC MAGE in the Kara Sea. Legend: 1 – seismic lines, 2 – elevation of the Archean-Proterozoic basement along the 1000 m contour line [17], 3 – hydrocarbon fields, 4 – license areas, 5 – wells of JSC AMIGE without (a) and with (b) penetrated permafrost (frozen ground) [10–13], 6 – examples of common shot gathers (CSGs) in Fig. 2 and 3, 7 – isobaths in m (constructed by the authors based on GEBCO data), 8 – the Kara Sea boundary

лили достаточно надежно анализировать преломленные волны в первых вступлениях.

Дополнительно для шельфа Карского моря были проведены аналитические исследования большого объема доступной информации, включая данные бурения и результаты изучения распространения ММП других авторов. При этом были собраны, проанализированы и загружены в геоинформационную систему «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО» [1–5]) результаты бурения в Карском море более

340 инженерно-геологических скважин АО АМИГЭ (см. рис. 1) [10–13], из которых 31 вскрыла ММП.

Краткое геолого-географическое и геокриологическое описание района работ

Карское море ограничено побережьем Западной Сибири и Таймыра на юге и юго-востоке, отделяется от других акваторий Северного Ледовитого океана архипелагами Новая Земля, Земля Франца-Иосифа

Таблица 1. Характеристика использованных данных сейсморазведки МОГТ МАГЭ 1979—2013 гг. по 74 профилям в Карском море

Table 1. Characteristics of the used common depth point (CDP) seismic survey data of the Joint-Stock Company MAGE from 1979 to 2013 for 74 seismic lines in the Kara Sea

Район работ	Годы работ	Количество профилей	Общая длина профилей, км		Количество каналов	Шаг между каналами, м
			всего	до 120 м		
Южно-Карский — SK	1979—1988	9	3 422	2 404	24—48	50—100
Обская губа — OB	1986—1987	7	291	291	24	50
Северо-Карский — NK	1983—1987	10	2 271	1 172	24—48	50—100
Приамальский — PY	2012—2013	19	1 122	1 119	168	25
Транзитная зона Ямала — PYT	2013	19	391	391	161—195	50
Региональный — 3-AR	2004—2005	1	1 428	1 167	336—414	12,5
Северо-Сибирский порог — NS	2012—2013	9	2 621	2 010	648	12,5
Всего	1979—2013	74	11 546	8 555	24—648	12,5—100

и Северная Земля (см. рис. 1). В Карское море попадает около 55% материкового стока всех рек сибирской Арктики [16]. Максимальные глубины моря достигают 300—400 м в Новоземельской впадине и желобе Воронина, 450—650 м в желобе Святой Анны.

По геологическому строению в акватории Карского моря выделяются Южно-Карский и Северо-Карский бассейны, разделенные Северо-Сибирским порогом — гигантским поднятием архейско-протерозойского фундамента, обнажающегося на полуострове Таймыр и на островах архипелага Северная Земля (см. рис. 1). В работе ОАО «Севморнефтегеофизика» (СМНГ) К. А. Долгунов с соавторами зафиксировали, что в Карском море «минимальные глубины залегания подошвы осадочного чехла, равные –250...–500 м, отмечены на Северо-Сибирском пороге, вблизи архипелага Новая Земля и на Центрально-Карском поднятии» [17, с. 76]. По данным сейсморазведки СМНГ фундамент обнажается («выходит под дно моря») вблизи Новой Земли и на локальном поднятии в центральной части Северо-Сибирского порога. Также отметим, что изогипсы –500 и –1000 м огибают побережье Таймыра с сопутствующими островами на удалении 10—60 км [17, с. 76]. Максимальные глубины осадочного чехла в Северо-Карском бассейне достигают 13—14 км [17, с. 77], а в Южно-Карском бассейне они превышают 12 км [18, с. 10].

Наиболее хорошо изучен сейсморазведкой МОГТ и бурением Южно-Карский бассейн, являющийся акваториальным продолжением северной части гигантского Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна [16]. Осадочный чехол представлен терригенными породами, разделяется на синрифтовый позднепермско-среднетриасовый и пострифтовый познетриасово-кайнозойский комплексы [19].

Высочайшие перспективы нефтегазоносности южной части Карского моря подтверждены геологораз-

ведочными работами, открывшими 8 месторождений углеводородов: Русановское (1989), Ленинградское (1990), Победа (2014), имени В. А. Динкова (2018), Няремейское (2018), 75 лет Победы (2019), имени маршала Жукова (2020), имени маршала Рокоссовского (2020). В прибрежной части в 2011 и 2016 гг. бурением доказано существование морских продолжений Харасавэйского и Круzenshternского месторождений, первоначально открытых на суше полуострова Ямал в 1974 и 1976 гг. Кроме того, открыто еще 19 месторождений, полностью или частично расположенных в Обской и Тазовской губах.

Северо-Карский бассейн исследован значительно хуже Южно-Карского, в нем проводилась сейсморазведка МОГТ МАГЭ и СМНГ (в основном с расстоянием между профилями от 40 до 60 км), но отсутствуют глубокие скважины и открытые месторождения [16]. В 2020 г. по программе бурения стратиграфических скважин в морях российской Арктики RoSDAr (Rosneft Stratigraphic Drilling in Arctic) ПАО «НК «Роснефть» и АО «АМИГЭ» проведено малоглубинное (до 40—90 м) бурение 10 скважин в восточной части Северо-Карского бассейна вблизи архипелага Северная Земля [20; 21]. Осадочный чехол представлен субгоризонтально залегающим маломощным (до 1—2 км) терригенным комплексом отложений мезозоя и кайнозоя, несогласно залегающим на эрозионной поверхности палеозоя, включающего терригенно-карбонатный комплекс кембрия-перми [17; 22]. По данным сейсморазведки, «в отложениях ордовика — силура выделены предполагаемые рифы и эвапориты» [17].

Опубликование мегарегиональных исследований по анализу распространения реликтовых ММП на всем арктическом шельфе [23; 24], а также для его российской части [27], облегчает задачу представления обобщающих сведений о ММП в Карском

море. Большая часть данных о региональном распространении ММП в Карском море преимущественно основана на результатах математических моделирований [23—30], частично подкрепленных материалами геофизических исследований и бурения АМИГЭ в Южно-Карском бассейне [10—13].

На официальном сайте Международной ассоциации вечной мерзлоты IPA (International Permafrost Association) [31] граница существования ММП в Карском море проведена преимущественно по изобатам 50—60 м, при этом ММП захватывают Южно-Карский и Северо-Карский бассейны.

В последнее десятилетие превалирует мнение об островном/спорадическом распространении ММП в Южно-Карском бассейне [27; 30], подтверждаемое результатами бурения множества инженерно-геологических скважин [11—13]. Однако имеются картографические построения с мощностью ММП у западного побережья Ямала и в Байдарацкой губе от 100 до 300—500 м (глубина нулевой изотермы) [23—25], что местами даже больше, чем на сопредельной суше Ямала.

Для Северо-Карского бассейна большинство авторов едино во мнении о слабой изученности данных о ММП, однако в результате моделирования и на основе других материалов здесь прогнозируется наличие сплошной достаточно мощной толщи ММП, что отражено в приведенных картографических и/или текстовых материалах: 200—700 м [23], 100—900 м (в основном 100—500 м) [24], 500—700 м (в основном 300—500 м) [25], 100—300 м (в основном 100—200 м) [27; 29], 200—600 м (в основном 300—400 м) [30]. Подобная информация о мощности ММП признается и содержится в работах по геотермии дна (100—600 м [32]) и электроразведке (300—400 м [33]).

Прогнозируемое наличие мощных толщ реликтовых ММП [23—31] позволяет прогнозировать существование мощной зоны стабильности сопутствующих газогидратов вплоть до глубин 1400 м при мощности ММП 600 м [30]. Однако никаких фактологических подтверждений данным прогнозам на Карском море и других акваториях арктического шельфа России нет.

Происходящая деградация ММП на дне Карского моря и на сопредельной суше способствует активизации процессов субвертикальной миграции парниковых газов и их эмиссии в атмосферу. При этом эмиссия газа нередко имеет характер взрывной дегазации Земли с образованием гигантских кратеров [4; 34—36].

Результаты исследований

Характерные примеры регистрируемых сейсмических волновых полей (сейсмограммы ОПВ) в Карском море могут быть проиллюстрированы на основе регионального сейсмопрофиля 3-AR (см. рис. 1). Данный профиль общей протяженностью 1428 км обрабатывался геофизическим судном «Профес-

сор Куренцов» МАГЭ в 2004—2005 гг. в два этапа с числом регистрирующих каналов от 336—348 до 414, при этом расстояние между каналами было 12,5 м, а расстояние между пунктами возбуждения колебаний — 50 м. В 2004 г. были проведены работы с числом регистрирующих каналов 336, а выносы первого канала были заданы 117,25 м. В 2005 г. были выполнены работы с числом каналов 414 с выносом первого канала 167,25 м.

На рис. 2 приведены фрагменты четырех сейсмограмм ОПВ регионального профиля 3-AR, зарегистрированных в Северо-Карском (NK1, NK2) и Южно-Карском (SK1, SK2) бассейнах, свидетельствующие о существенных различиях их геологического строения. На сейсмограммах подписаны значения скоростей распространения преломленных и/или отраженных волн в начальных частях регистрации упругих колебаний, включая первые вступления. Также подписаны расчетные значения скоростей прямых волн, распространяющихся в водной толще со скоростями 1,41 км/с (NK1, NK2) и 1,42 км/с (SK1, SK2). Небольшие различия в этих скоростях, видимо, обусловлены разной соленостью воды в летне-осеннее время за счет привноса пресных речных вод.

Из четырех сейсмограмм ОПВ (см. рис. 2) лишь на одной SK1 обнаружены преломленные волны, образовавшиеся на поверхности высокоскоростных отложений вблизи дна, отождествляемых нами с наличием ММП. Преломленные волны от акустически жестких геологических горизонтов в верхней части разреза обычно прослеживаются практически на всей длине сейсмокоды (см. сейсмограммы NK1, NK2, SK2). В частности, на сейсмограмме NK1, зарегистрированной в зоне поднятия фундамента около архипелага Северная Земля, в первых вступлениях наблюдаются преломленные волны от границы на глубине до 200 м (скорость 2,4 км/с) и кристаллического фундамента (6,2 км/с), а на NK2 наблюдается интерференция преломленных волн от трех горизонтов в осадочной толще Северо-Карского бассейна (2,1, 2,7 и 3,9 км/с). В Южно-Карском бассейне на сейсмограмме SK2 скорости преломленных волн (1,8, 2,0 и 2,2 км/с) существенно ниже, чем на сейсмограммах NK1 и NK2, что обусловлено меньшей консолидацией отложений.

Как показали результаты наших предыдущих исследований на АШВС [1—6], преломленные волны от мерзлых отложений за счет сильного затухания обычно регистрируются до максимальных удалений от источника возбуждения колебаний лишь 1,0—2,2 км, что в разы меньше, чем преломленные волны от геологических горизонтов [6]. Преломленным волнам от ММП часто сопутствуют сильные многократные отраженно-преломленные волны (см. рис. 2 — SK1 и рис. 3 — SK3, SK4), при этом в дальней зоне в первых вступлениях регистрируются отраженные волны. Наличие высокоскоростных ММП приводит к потере прослеживаемости (экранирова-

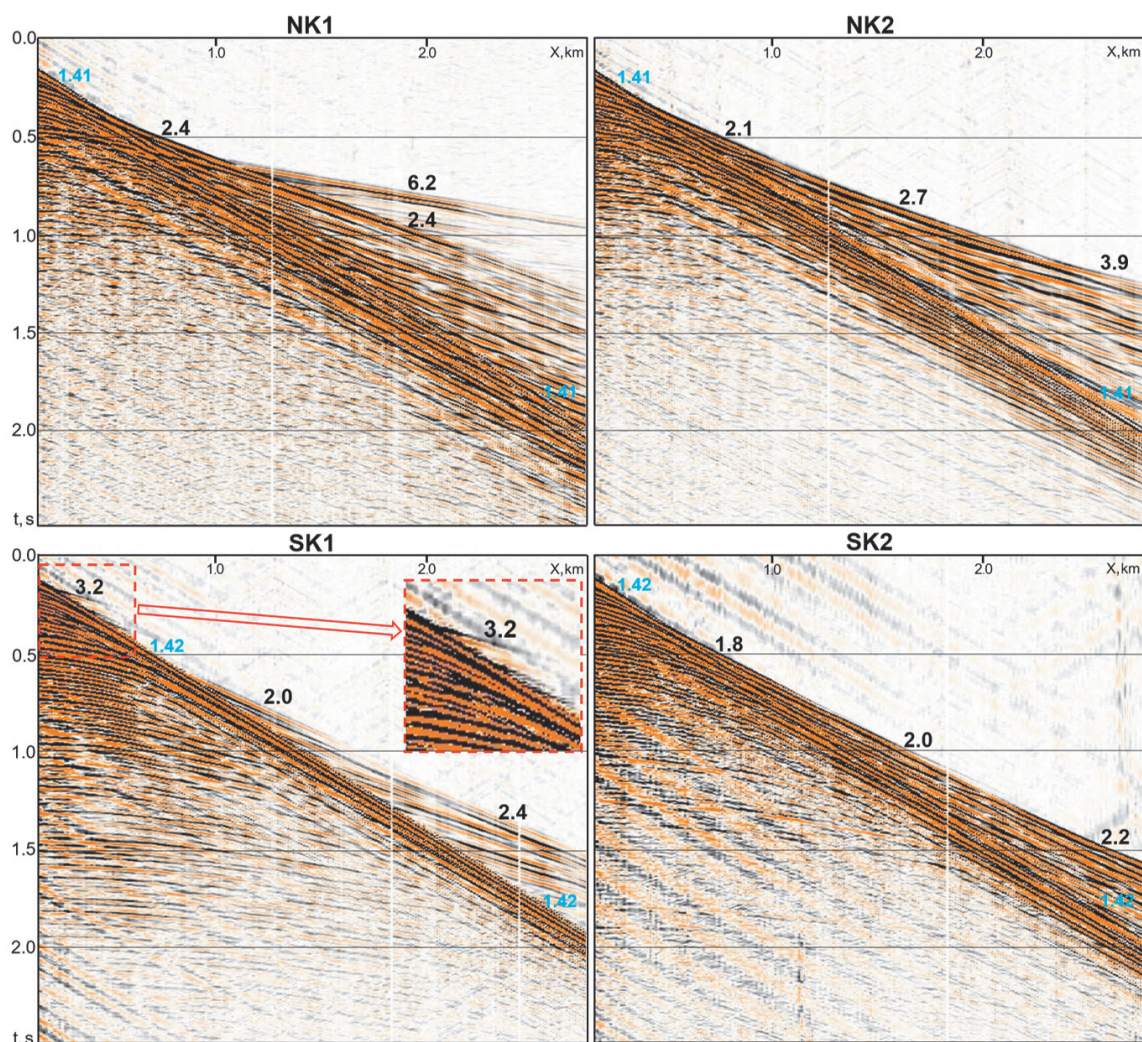


Рис. 2. Фрагменты сейсмограмм ОПВ по сейсмопрофилю 3-AR в Северо-Карском (NK1, NK2) и Южно-Карском (SK1, SK2) бассейнах. Примечания: цифры на сейсмограммах – скорости распространения сейсмических волн (км/с), X – расстояние от источника до приемника колебаний, положение сейсмограмм показано на рис. 1

Fig. 2. Fragments of seismograms of CSGs along seismic line 3-AR in the North Kara (NK1, NK2) and South Kara (SK1, SK2) basins. Notes: numbers on the CSGs – seismic wave propagation velocities (km/s), X – the distance from the wave source to the receiver, the position of the CSGs is shown in Fig. 1

нию) преломленных волн от геологических горизонтов в придонных отложениях [6].

На сейсмограмме SK1 (см. рис. 2) преломленные волны от ММП наблюдаются на максимальном удалении всего 0,4 км, при этом скорость их распространения достигает достаточно высокого значения 3,2 км/с, характерного для твердомерзлых отложений. Столь короткий интервал регистрации преломленных волн от ММП, видимо, свидетельствует о латеральной ограниченности участка существования ММП, т. е. об их островном развитии. Для северо-восточной части Южно-Карского бассейна это подтверждается примером сейсмограммы SK3 (см. рис. 3) из южной части сейсмопрофиля NST1301021, удаленной от побережья Таймыра на 60 км. Именно здесь обнаружен самый протяженный участок развития твердомерзлых ММП около 30 км (см. рис. 4),

от которого регистрируются преломленные волны со скоростями 3,9 км/с до удалений 1,5 км. На расположенном к северо-западу от этого участка сейсмопрофиле NST1319014 регистрируются преломленные волны со скоростями 2,6 км/с до удалений 1,1 км (см. рис. 3 — SK4). На сейсмограммах SK3 и SK4 также прослеживаются преломленные волны со скоростями 6,2 км/с от неглубоко расположенного фундамента (около 1 км).

На профиле 3-AR, а также на ряде других профилей в Южно-Карском бассейне обнаружено 174 небольших участка развития ММП со скоростями распространения преломленных волн 1,9—4,0 км/с, что отражено на рис. 4. Наибольшее количество участков, на которых регистрируются высокоскоростные преломленные волны от кровли ММП (см. рис. 4), выявлено на расстоянии до 42 км от запад-

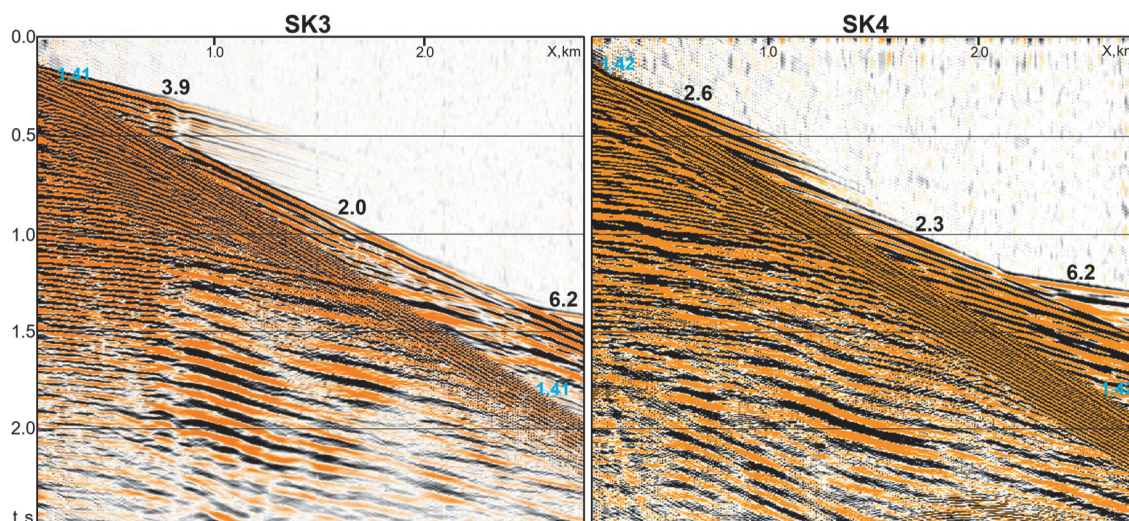


Рис. 3. Фрагменты сейсмограмм ОПВ в северо-восточной части Южно-Карского бассейна (SK3, SK4). См. примечания на рис. 2
Fig. 3. Fragments of seismograms of CSGs in the north-eastern part of the South Kara Basin (SK3, SK4). See notes in Fig. 2

ного побережья полуострова Ямал на участках РY и РYТ (49), в северной части Обской губы (ОВ — 14), а также в северной части Южно-Карского бассейна, прилегающей к Северо-Сибирскому порогу (НС — 62). Непосредственно над самим Северо-Сибирским порогом в пределах изогипсы –1000 м обнаружено всего 33 участка с ММП.

В Северо-Карском бассейне (см. рис. 4 — НК) проанализировано около 1,4 тыс. км сейсмопрофилей, включая северный участок регионального профиля 3-AR (см. рис. 1, 2 и 3). Анализ волновых полей по сейсмограммам ОПВ показал повсеместное наличие преломленных волн только от геологических границ. Два характерных примера таких сейсмограмм приведены на рис. 2 (НК1, НК2). Ни на одном участке района НК мы не наблюдали преломленные волны, которые могли быть вызваны существованием ММП и/или газогидратов.

На основе картографической схемы результатов анализа физического состояния придонных отложений по скоростям распространения целевых преломленных волн (см. рис. 3) составлена итоговая картографическая схема распространения мерзлых и талых пород в пределах Карского моря, приведенная на рис. 5. Наличие больших участков сплошного развития ММП нигде не установлено (узкая прибрежная зона не рассмотрена). Обнаружены лишь отдельные небольшие участки ММП островного характера, размер которых в основном меняется от 500 до 1500 м. В связи с значительными различиями скоростей распространения преломленных волн на большинстве соседних участков/островов, где прогнозируется наличие ММП в пластичномерзлом или твердомерзлом состояниях (скорости от 1,9 до 4,0 км/с), на рис. 5 показана единая зона островного и/или редкоостровного развития ММП (permafrost isolated patches [31]). Ее площадь составила 211,3 тыс. км² (34,1%), а площадь зоны распространения талых пород — 394,3 тыс. км² (63,6%). При этом вопрос о границах

сохранения ММП вблизи берегов на площади около 14,4 тыс. км² (2,3%) остается открытым.

Обсуждение результатов

Южно-Карский бассейн

По данным С. И. Рокося с соавторами [13, с. 25], результаты бурения с борта научно-исследовательского судна «Кимберлит» АМИГЭ около 150 инженерно-геологических скважин глубиной от 10 до 70 м от дна и данные сейсмоакустических исследований показали, что «...на большей части площади Обской и Тазовской губ развит крупный, скорее всего, сквозной талик. ММП распространены в узких прибрежных полосах и в виде локальных островных массивов в северной части Обской губы, а также под дном искусственно врезанных участков акваторий». Последнее относится к скважине Ямбургская-1, пробуренной АМИГЭ на дне расширенной акватории порта Ямбург. Этот результат в основном согласуется с результатами проведенного нами анализа регистрируемых преломленных волн по трем сейсмопрофилям на широте 69,5—70° (см. рис. 4). Кроме того, он подтверждается бурением всех глубоких нефтегазопроисловых скважин на структурах, приведших к открытию ряда месторождений, включая Каменномыское-море, Северо-Каменномыское, Чугорьяхинское и Семаковское (см. рис. 1).

В северной части Обской губы (см. рис. 4) на ряде участков трех сейсмопрофилей (номера 87340, 88428, 87352) на сейсмограммах ОПВ обнаружены преломленные волны со скоростями до 3,4 км/с, относимые к твердомерзлым породам. Вблизи от этих профилей АМИГЭ при бурении трех скважин (забой от дна № 1 — 50 м, № 2 — 40 м и № 3 — 14,5 м) на глубинах от дна 9,0—26,5 м были вскрыты пластичномерзлые глины и суглинки разной степени засоления морского типа (от незасоленных до сильнозасоленных — 0,1—1,5%). В двух наиболее глубоких скважинах (№ 1 и 2), пробуренных

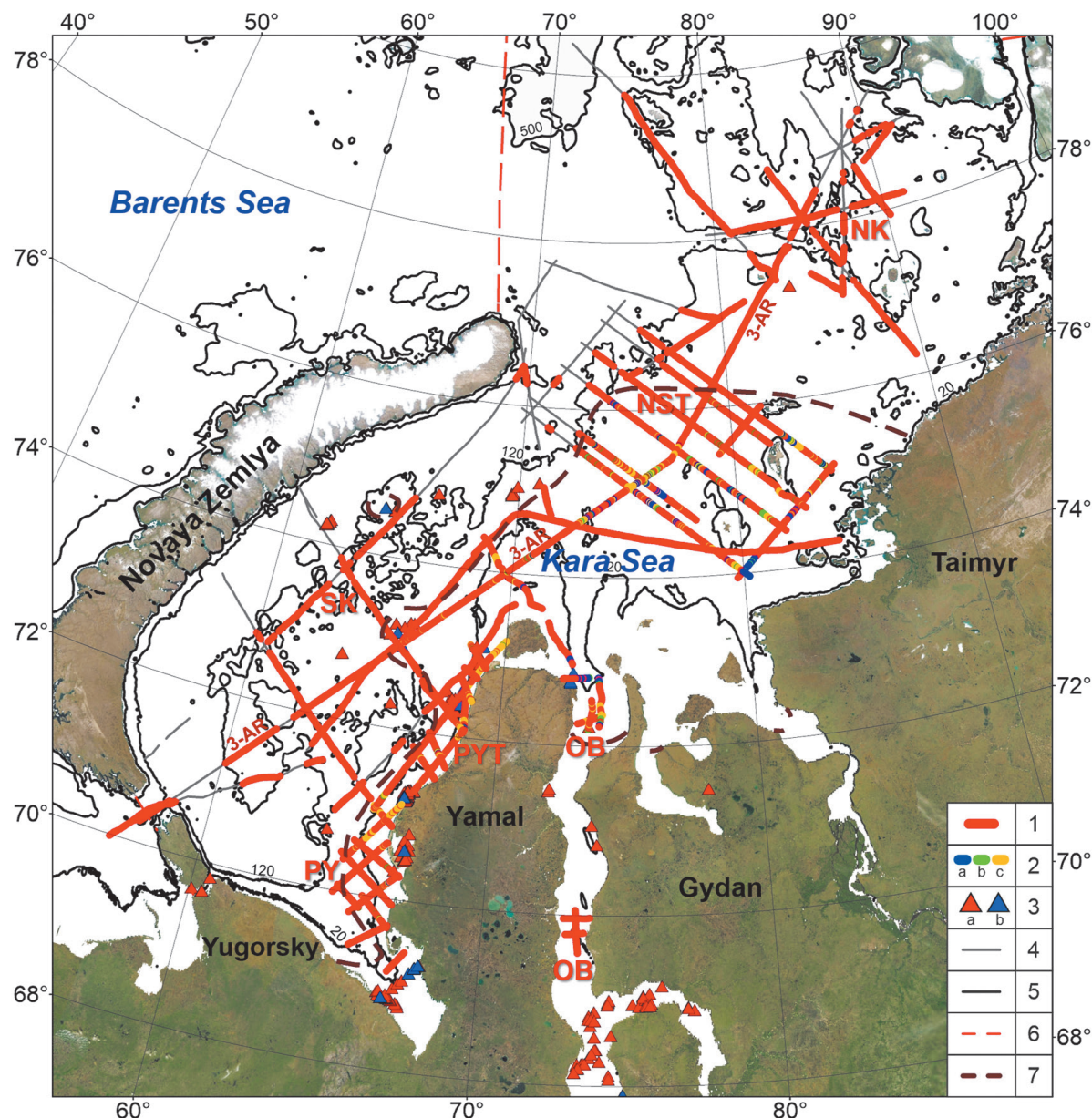


Рис. 4. Результаты анализа физического состояния придонных отложений в районах исследований в Карском море. Обозначения: 1 – отсутствие преломленных волн от ММП; 2 – существование преломленных волн от ММП со скоростями 2,8–4,0 км/с (а), 2,3–2,8 км/с (b) и 1,9–2,3 км/с (с); 3 – скважины АМИГЭ, не подтвердившие (а) и подтвердившие (b) наличие ММП [10–13]; 4 – участки сейсмопрофилей на глубинах свыше 120 м; 5 – изобаты в метрах (построены авторами на основе данных GEBCO); 6 – границы Карского моря; 7 – границы развития островной мерзлоты и талых пород по данным авторов

Fig. 4. Results of analysis of the physical state of near-bottom sediments in the Kara Sea study areas. Legend: 1 – absence of refracted waves from permafrost; 2 – existence of refracted waves from permafrost with velocities of 2.8–4.0 km/s (a), 2.3–2.8 km/s (b) and 1.9–2.3 km/s (c); 3 – wells of JSC AMIGE without (a) and with (b) penetrated permafrost [10–13]; 4 – parts of seismic lines at depths greater than 120 m; 5 – isobaths in m (constructed by the authors based on GEBCO data); 6 – the Kara Sea boundaries; 7 – boundaries of permafrost isolated patches and thawed ground distribution according to the authors' data

в 2005 г. в 2,7 и 3,8 км от берега, ниже пластично-мерзлых были вскрыты твердомерзлые грунты [13]. Кроме того, в скважине № 3, пробуренной в 2010 г. в 15,3 км от берега (глубина воды 20 м), пластично-мерзлые глины ниже 9 м содержали включения льда максимальной толщиной до 20 см. Отметим, что вблизи от этих трех скважин (до 4–5 км) были пробурены еще две скважины (№ 4 и 5), не вскрывшие ММП. Таким образом, самая северная часть

Обской губы характеризуется нами как район развития редкоостровных твердомерзлых пород или, по терминологии С. И. Рокося, это «довольно редкие локальные массивы субмаринных реликтовых ММП» [13, с. 22].

Несколько южнее рассмотренного выше самого северного района Обской губы на трех сейсмопрофилях (номера 87352, 87353, 87348) на площади около 25×35 км обнаружен ряд участков

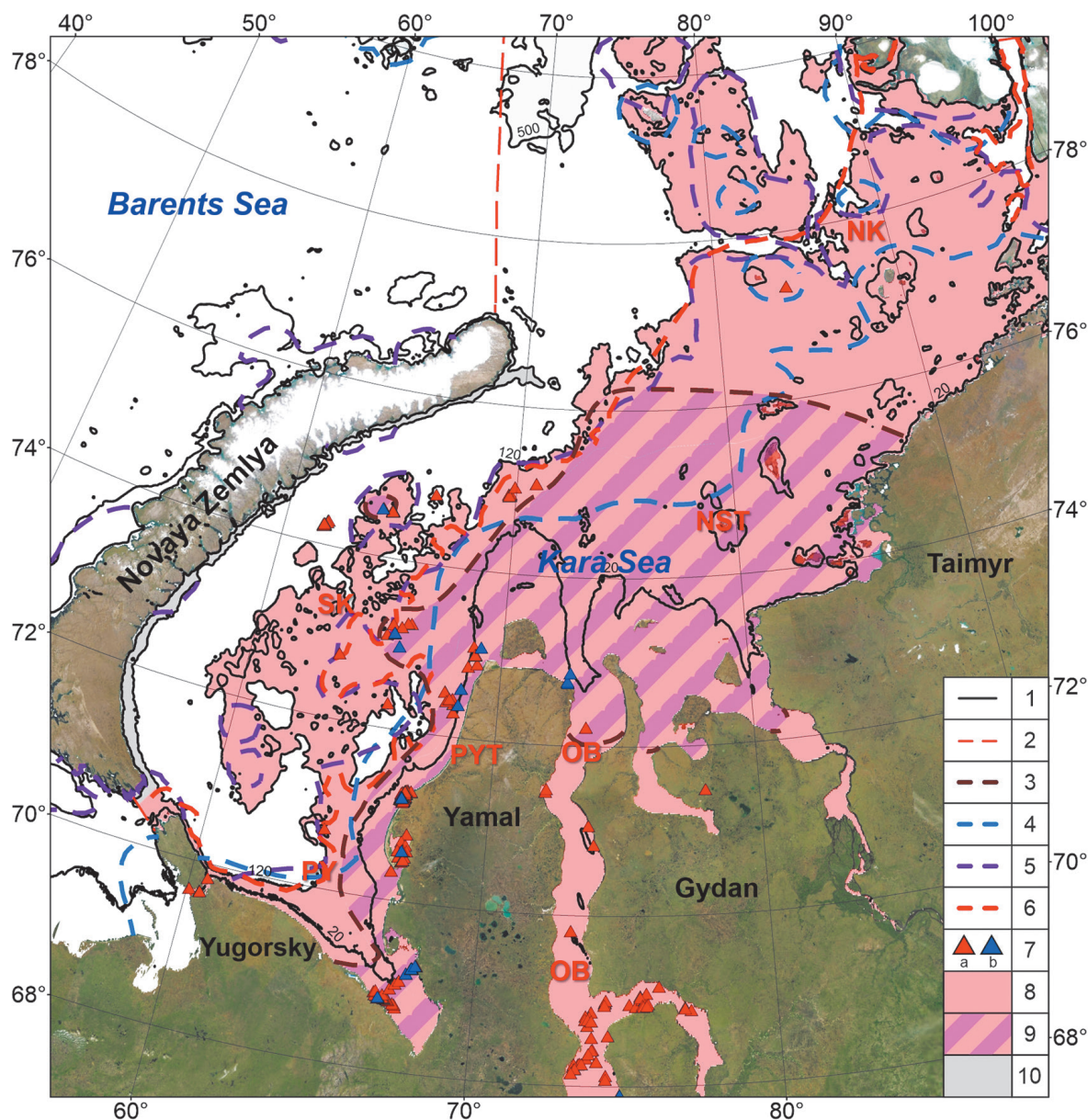


Рис. 5. Сопоставление зон распространения мерзлых и талых пород в Карском море. Обозначения: 1 – изобаты (м); 2 – границы морей; 3 – границы развития островной мерзлоты и талых пород по данным авторов; 4–6 – границы развития мерзлоты по данным: 4 – IPA/Brown et al. [31], 5 – P. Overduin et al. [23–25], 6 – Gavrilov et al. [27]; 7 – скважины АМИГЭ, не подтвердившие (а) и подтвердившие (b) наличие ММП [10–13]; 8 – зона отсутствия реликтовых ММП (талые породы), 9 – зона островного и/или редкоостровного развития ММП; 10 – «серая зона» (недостаток информации)

Fig. 5. Comparison of permafrost and thawed ground distribution zones in the Kara Sea. Legend: 1 – isobaths (m); 2 – sea boundaries; 3 – boundaries of permafrost isolated patches and thawed ground distribution according to the authors' data; 4–6 – permafrost distribution boundaries according to the data of: 4 – IPA/Brown et al. [31], 5 – Overduin et al. [23–25], 6 – Gavrilov et al. [27]; 7 – wells of JSC AMIGE without (a) and with (b) penetrated permafrost [10–13]; 8 – zone with absence of relic permafrost (thawed ground); 9 – zone of permafrost isolated patches distribution; 10 – 'grey zone' (lack of data)

с преломленными волнами, имеющими скорости до 2,8 км/с. Эта площадь может быть охарактеризована как район развития редкоостровных преимущественно пластичномерзлых пород. Оба рассмотренных района в северной части Обской губы характеризуются отрицательными температурами придонной воды и отложений вплоть до $-1,8^{\circ}$ [37; 38], что замедлило деградацию ММП по

сравнению с остальной частью губы, расположенной южнее в условиях положительных придонных температур. При этом соленость придонных вод за счет проникновения морской воды летом достигает 24–30‰ [38].

Севернее Байдарацкой губы (см. рис. 4 – PY) на трех сейсмопрофилях (PY1216-03, PY1210-04, PY1214-08) на основе анализа преломленных волн

выделено несколько небольших участков с пониженными скоростями от 1,9 до 2,7 км/с, свидетельствующими о существенной деградации ММП (см. рис. 4). Это хорошо согласуется с выводами АМИГЭ, проводившей огромный объем инженерно-геологического бурения (639 скважин глубиной 7—40 м от дна) с целью анализа придонных отложений вдоль трасс четырех линий магистральных газопроводов в полосе протяженностью около 70 км и шириной 0,5—1 км [11]. По данным бурения вблизи побережий полуостровов Ямал и Югорский, материковые ММП резко обрываются у самого берега, а в прибрежной полосе 100—200 м до глубин воды 2,5 м вскрыты ММП, видимо, сезонного характера. Важно отметить, что на глубинах воды 5,5—17,5 м 14 скважин вскрыли три участка ММП. Самый крупный массив ММП имел длину 10,5 км, а его кровля находилась в казанцевском горизонте на глубинах 12—30 м от дна (глубина дна 12—18 м). Засоленность морского типа пластичномерзлых суглинков изменяется от 0,32% до 0,49%. В итоге АМИГЭ обобщено, что «мерзлые грунты, содержащие в своем составе лед, сохранились в виде локальных массивов (криореликтов), разделенных обширными таликами (островной тип распространения)» [11, с. 12].

В 2012 г. во время российско-норвежской экспедиции в Карском море около западного побережья Ямала от Бадарацкой губы до Харасавэйского месторождения (широты от 69° до 71,5°) были выявлены обширные участки сипов газа площадью не менее 7500 км², преимущественно расположенные на глубинах свыше 20 м [39; 40]. На основании этого было сделано предположение, что «сплошная подводная вечная мерзлота простирается на глубину около 20 м от берега и создает преграду, через которую газ не может мигрировать» [39]. Проведенный нами анализ записей преломленных волн около западного берега Ямала на глубинах моря от 0—10 м (Р_{УТ}) до 5—20 м (Р_У) полностью опровергает существование сплошной мерзлоты в данном районе. Кроме того, на основе анализа данных ДЗЗ в оптическом диапазоне частот было обнаружено огромное количество кратеров/покмарок на глубинах моря до 3—4 м в непосредственной близости от берегов (удаления 0—2,2 км) [34; 35], в том числе в районах однозначного сохранения субаквальных ММП, включая залив Шарапов Шар с подтвержденным бурением частичным сохранением ММП. Это свидетельствует о слабых экранирующих свойствах выявленных участков деградирующих ММП.

На ряде сейсмопрофилей около побережья Харасавэйского газоконденсатного месторождения (НГКМ) (см. рис. 4 — Р_{УТ}) по записям преломленных волн выделено несколько участков существования ММП в твердомерзлом состоянии (скорости от 2,4 до 2,7 км/с) и в разной степени деградации (от 1,9 до 2,1 км/с). В этом районе ММП вскрыты скважинами не только вблизи берега (до 350 м от абразионных берегов). На удалении от берега 5—7 км

тремя скважинами (№ 55, 5 и 7) на глубине около 22 м от уровня моря вскрыта кровля обособленного массива реликтовых ММП [41, с. 135; 42]. Отметим, что в связи с тем, что пробуренные на море скважины имели глубины от уровня моря всего 24—35 м, мы не исключаем существование ММП на большем участке, в том числе, возможно, что этот массив реликтовых ММП соединяется с прибрежными ММП.

К северу от Харасавэйского НГКМ, в том числе около острова Белый, на ряде сейсмопрофилей (Р_{У1301}, Р_{У1303}, Р_{У1305}, Р_{У1306}, Р_{У1307}, Р_{У1308}) на удалениях до 32 км от берега Ямала обнаружены преломленные волны со скоростями 1,9—3,2 км/с, свидетельствующими о наличии островов ММП в разной степени деградации (см. рис. 4). Наличие останцов реликтовых ММП подтверждается скважинами АМИГЭ на Нярмейской и Скуратовской площадях, на которых при глубинах моря 24 и 20 м в 2018 и 2019 гг. ПАО «Газпром» были открыты месторождения Нярмейское и 75 лет Победы.

В районе Русановского месторождения (включая выделенное в 2019 г. месторождение имени Динкова), удаленного от берега полуострова Ямал на 150 км, при глубине воды от 65 до 100 м на сейсмограммах ОПВ трех рассмотренных нами сейсмопрофилей (3-AP, 79401, 86430) отождествляемые с реликтовыми ММП записи преломленных волн были обнаружены лишь на 6 небольших (менее 2 км) участках профиля 3-AR. При этом скорости распространения преломленных волн были в диапазоне 1,9—2,3 км/с, что свидетельствует о сильной деградации ММП. Непосредственно на Русановском месторождении на расстояниях от трех отмеченных выше сейсмопрофилей 2,24—10,29 км АМИГЭ при бурении трех скважин на фоне многолетнеохлажденных грунтов были вскрыты два останца ММП: при глубине моря 80 м в скважине № 206 вскрыты пластичномерзлые (с 9,5 м) и твердомерзлые (с 17 м) глины; при глубинах моря 114 и 109 м в двух близкорасположенных (600 м) скважинах № 253 (интервал 13,5—32,5 м) и № 254 (8,4—18,5 м) [41, с. 150—153]. Это может быть объяснено очень ограниченными по размерам участками вскрытых тремя скважинами двух «редких островов ММП» [41, с. 154].

Северо-Карский бассейн

В Северо-Карском бассейне (НК) в результате анализа около 1,4 тыс. км сейсмопрофилей ни на одном участке не были обнаружены преломленные волны, обусловленные возможным существованием ММП и/или газогидратов (см. рис. 4 — НК). Этот результат достаточно удивителен в связи с тем, что в районе НК по данным всех модельных расчетов [23—30] было спрогнозировано наличие сплошных мощных толщ ММП: от относительно скромных 100—300 м [27; 29] до 500—700 м [23—25; 30]. Весьма вероятно, отсутствие ММП связано с тем, что при последнем ледниковом максимуме (около 20 тыс. лет на-

зад) значительная часть Северо-Карского бассейна была покрыта ледниковым щитом [43; 44], который мог предохранить осадочную толщу от глубокого промерзания. В этом случае сейсмопрофили района НК, на которых не выделено преломленных волн от возможных ММП, могут быть использованы для уточнения границ распространения ледника. Также возможно, что в этих районах ММП существовали, но к настоящему времени полностью деградировали. В этом случае спрогнозированное наличие сплошных мощных толщ по данным моделирования [23—30] может быть объяснено низкими значениями заданного теплового потока.

В Северо-Карском бассейне на Макаровской площади АМИГЭ пробурены три самые северные инженерно-геологические скважины (координаты около 77,346° N, 83,85° S), которые не вскрыли ММП. Кроме того, в восточной части Северо-Карского бассейна по проекту ПАО «НК «Роснефть» АМИГЭ проводилось бурение 10 стратиграфических скважин, при этом в опубликованных материалах информация о вскрытии ММП отсутствует [20; 21].

В связи с тем, что сейсмопрофили в Северо-Карском бассейне удалены от берега полуострова Таймыр и островов архипелага Северная Земля не менее чем на 76 км (сейсмопрофиль 87444), вопрос о существовании ММП в прибрежной зоне остается открытым. Однако можно предположить существование ММП лишь на очень ограниченных удалениях от берега в связи с близким залеганием пород фундамента, имеющих теплопроводность выше, чем у терригенно-карбонатных отложений Северо-Карского бассейна. Подобная ситуация зафиксирована бурением АМИГЭ в Байдарацкой губе около побережья полуострова Югорский [11].

Возможные причины сохранения островов реликтовой мерзлоты

Первым автором данной статьи сформулирована гипотеза о том, что сохранение островных и/или редкоостровных реликтовых ММП связано с локальным снижением воздействия теплового потока Земли, которое возможно за счет различий в литологическом составе пород и физических свойств насыщающих поровое пространство флюидов, имеющих различную теплопроводность. В частности, снижению теплопроводности пористых сред способствует их насыщение газом в свободном и/или гидратном состояниях [45]. Кроме того, диссоциация газогидрата является эндотермическим процессом, приводящим к поглощению части теплового потока Земли и, как следствие, к торможению процесса деградации вышерасположенных ММП.

Весьма вероятно, что вскрытие останцов ММП на ряде месторождений Карского моря (Русановском, Харасавэйском, Крузенштернском, Нярмейском, 75 лет Победы), а также на других участках связано с наличием промышленных залежей газа, небольших залежей газа в верхней части разреза (газовых карманов) и/или газогидратов [46], замедливших

деградацию ММП снизу под влиянием теплового потока. При этом активное протаивание придонных реликтовых мерзлых грунтов сверху тормозится отрицательной температурой придонного слоя воды (до $-1,8^{\circ}$ [37]), установившейся на постгляциальном этапе трансгрессии арктического бассейна.

На данном этапе исследований вышесказанное является логической гипотезой, требующей доказательств на основе фактических данных.

Заключение

Впервые для площади 620 тыс. км² Карского моря проведены обработка и комплексный анализ большого объема записей преломленных волн, содержащихся в первых вступлениях сейсмограмм общего пункта взрыва 74 сейсмопрофилей МОГТ МАГЭ общей протяженностью около 11,5 тыс. км.

Обосновано, что в наиболее хорошо изученном Южно-Карском бассейне процесс деградации реликтовых ММП в основном завершился. При этом на 174 обособленных участках сохранились островные твердомерзлые и/или пластичномерзлые породы. Эти данные согласуются с ранее сделанными специалистами АМИГЭ выводами на основе бурения инженерно-геологических скважин.

Для недостаточно изученного Северо-Карского бассейна получена принципиально новая информация о полном отсутствии реликтовых ММП, что кардинально отличается от всех других результатов исследований, в основном базирующихся на данных математического моделирования, обосновавшего существование сплошной достаточно мощной толщи ММП. Весьма вероятно, что отсутствие реликтовых ММП в Северо-Карском бассейне связано с существованием ледникового щита в последний гляциальный период.

Выдвинута логическая гипотеза о том, что сохранение островной мерзлоты в Южно-Карском бассейне, в том числе на ряде месторождений углеводородов, связано с локальным снижением воздействия теплового потока при его прохождении через залежи газа в свободном и/или гидратном состояниях.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института проблем нефти и газа РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (№ 125020501403-7).

Литература/References

1. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Академии наук. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 83—89. — DOI: 10.31857/S2686739721090048.
Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Permafrost, Gas Hydrates and Gas Seeps in the Central

- Part of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, no. 1, pp. 766—771. DOI: 10.1134/S1028334X2109004X.
2. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота и газогидраты на Арктическом шельфе Восточной Сибири // Доклады Академии наук. — 2022. — Т. 507, № 1. — С. 110—117. — DOI: 10.31857/S268673972260134X.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Permafrost and Gas Hydrates on the East Siberian Arctic Shelf. Doklady Earth Sciences*, 2022, vol. 507, no. 1, pp. 946—951. DOI: 10.1134/S1028334X22600578.
3. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Распространение субаквальной мерзлоты в море Лаптевых по данным сейсморазведки методом преломленных волн // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 378—392.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Distribution of subsea frozen ground in the Laptev Sea based on seismic refraction data. Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 378—392. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-378-392.
4. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестн. РАН. — 2024. — Т. 94, № 10. — С. 896—914.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V. Geophysical methods of ensuring technological sovereignty and national security of Russia in the Arctic. Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2024, vol. 94, no. 10, pp. 32—46. DOI: 10.31857/S0869587324100055.
5. *Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of wide-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic Shelf (Laptev and East Siberian seas). Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 148, p. 106050. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106050>.
6. *Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. New information on subsea frozen ground in the Laptev and East Siberian seas based on seismic data. Doklady Earth Sciences*, 2025, vol. 521, p. 11. DOI: 10.1134/S1028334X24605583.
7. Доклад о важнейших научных достижениях российских ученых в 2024 году. — Т. 1: Материалы отделений РАН, ПАЧН, PAO и PAX. — М.: РАН, 2025. — 394 с.
- Report on the most important scientific achievements of Russian scientists in 2024. Vol. 1. Materials of the branches of the Russian Academy of Sciences and et al. Moscow, RAS, 2025, 394 p. (In Russian).
8. *Vasiliev A. A., Oblogov G. E., Belova N. G. Submarine permafrost maps of the Russian Arctic. A Review. Geography, Environment, Sustainability*, 2025, 3 (18), pp. 107—117. Available at: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3966>.
9. ГОСТ 25100—2011. Грунты. Классификация. Межгосударственный стандарт. — М.: Стандартинформ, 2018. — 42 с.
- GOST 25100—2011. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2018, 42 p. (In Russian).
10. Куликов С. Н., Рокос С. И. Выделение массивов многолетнемерзлых пород на временных сейсмоакустических разрезах мелководных районов Печорского и Карского морей // Инженер. изыскания. — 2017. — № 3. — С. 34—42.
- Kulikov S. N., Rokos S. I. Identification of permafrost soil bodies in seismoacoustic records of shallow water areas of the Pechora and Kara Seas. Engineering Surveys*, 2017, no. 3, pp. 34—42. (In Russian).
11. Рокос С. И., Костин Д. А., Тулапин А. В. и др. Мерзлые и охлажденные грунты криолитозоны Байдарцкой губы // Криосфера Земли. — 2023. — Т. 27, № 5. — С. 3—15.
- Rokos S. I., Kostin D. A., Tulapin A. V. et al. Frozen and cooled soils of the Baydaratskaya Bay cryolithozone. Earth's Cryosphere*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 3—15. DOI: 10.15372/KZ20230501. (In Russian).
12. Рокос С. И., Тулапин А. В., Длугач А. Г. Многолетнемерзлые грунты Приямальского шельфа Карского моря // Тр. VI Международной конференции «ГеоЕвразия-2023. Геологоразведочные технологии — наука и бизнес». — М., 2023. — С. 23—26.
- Rokos S. I., Tulapin A. V., Dlugach A. G. Permafrost soils of the Yamal shelf of the Kara Sea. Proceedings of the International Conference "GeoEurasia-2023. Geological Exploration Technologies — Science and Business". Moscow, 2023, pp. 23—26. Available at: <https://geowebinar.com/geoeurasia-2023>. (In Russian).*
13. Рокос С. И., Костин Д. А., Куликов С. Н. Субаквальные многолетнемерзлые породы Обской и Тазовской губ Карского моря // Криосфера Земли. — 2019. — Т. 23, № 5 (97). — С. 17—26.
- Rokos S. I., Kostin D. A., Kulikov S. N. Subaqueous permafrost of the Ob and Taz bays of the Kara Sea. Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 5 (97), pp. 17—26. (In Russian).
14. *Brothers L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf. Geophysical research letters*, 2012, vol. 39, no. 15, L15501, pp. 1—6. DOI: 10.1029/2012GL052222.
15. *Lyu C., Amiri S. G., Grimstad G. et al. Comparison of geoacoustic models for unfrozen water content estimation. J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, vol. 125, iss. 10, p. e2020JB019766. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020JB019766>.
16. Сенин Б. В., Керимов В. Ю., Богоявленский В. И. и др. Нефтегазоносные провинции морей России и сопредельных стран. — Кн. 2: История освоения и общая характеристика морской периферии России. Нефтегазоносные провинции морей Западной Арктики. — М.: Недра, 2020. — 340 с.
- Senin B. V., Kerimov V. Yu., Bogoyavlensky V. I. et al. Oil and gas provinces of the seas of Russia and adjacent countries. B. 2. History of development and general characteristics of the marine periphery of Russia. Oil and gas provinces of the Western Arctic seas. Moscow, Nedra, 2020, 340 p. (In Russian).*

17. Долгунов К. А., Мартыросян В. Н., Васильева Е. А., Сапожников Б. Г. Структурно-тектонические особенности строения и перспективы нефтегазоносности северной части Баренцево-Карского региона // Геология нефти и газа. — 2011. — № 6. — С. 70—83.
Dolgunov K. A., Martirosyan V. N., Vasilyeva E. A., Sapozhnikov B. G. Structural and tectonic features of the structure and petroleum potential of the northern part of the Barents-Kara region. *Geologiya Nefti i Gaza*, 2011, no. 6, pp. 70—83. (In Russian).
18. Конторович А. Э., Эпов М. И., Бурштейн Л. М. и др. Геология, ресурсы углеводородов шельфов арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 1. — С. 7—17.
Kontorovich A. E., Epov M. I., Burshtein L. M. et al. Geology and hydrocarbon resources of the continental shelf in Russian Arctic seas and the prospects of their development. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, pp. 3—11. DOI: 10.1016/j.rgg.2009.12.003. (In Russian).
19. Никишин В. А., Малышев Н. А., Никишин А. М., Обметко В. В. Позднепермско-триасовая система рифтов Южно-Карского осадочного бассейна // Вестн. Моск. ун-та. — Сер. 4. Геология. — 2011. — № 6. — С. 3—9.
Nikishin V. A., Malyshev N. A., Nikishin A. M., Obmetko V. V. Late Permian-Triassic rift system of the South Kara sedimentary basin. *Bull. of Moscow University. Ser. 4. Geology*, 2011, no. 6, pp. 3—9. (In Russian).
20. Малышев Н. А., Вержбицкий В. Е., Скарятин М. В. и др. Стратиграфическое бурение на севере Карского моря: первый опыт реализации проекта и предварительные результаты // Геология и геофизика. — 2023. — Т. 64, № 3. — С. 311—326. — DOI: 10.15372/GIG2022131.
Malyshev N. A., Verzhbitskii V. E., Skaryatin M. V. et al. Stratigraphic Drilling in the Northern Kara Sea: First Case and Preliminary Results. *Russian Geology and Geophysics*, 2023, vol. 64, no. 3, pp. 257—269. DOI: 10.2113/RGG20224459.
21. Малышев Н. А., Вержбицкий В. Е., Колюбакин А. А. и др. Технологические аспекты и опыт стратиграфического бурения в морях российской Арктики // Геология нефти и газа. — 2024. — № 3. — С. 19—30.
Malyshev N. A., Verzhbitskii V. E., Kolyubakin A. A. et al. Technological aspects and experience of stratigraphic drilling in the seas of the Russian Arctic. *Geologiya nefti i gaza*, 2024, no. 3, pp. 19—30. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-3-19-30. (In Russian).
22. Конторович В. А., Бурштейн Л. М. Сейсмогеологическая характеристика, нефтегазоносность и ресурсы Северо-Карского осадочного бассейна // Геология и геофизика. — 2025. — № 4. — С. 501—512. — DOI: 10.15372/GIG2024169.
Kontorovich V. A., Burshtein L. M. Geoseismic characteristics, hydrocarbon potential and resources of the north Kara sedimentary basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2025, vol. 66, no. 4, pp. 460—470. DOI: 10.2113/RGG20244781.
23. Overduin P. P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M. N. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP). *J. of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124, pp. 3490—3507. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018JC014675>.
24. Overduin P. P., Portnov A., Ruppel C. D. Permafrost Beneath Arctic Ocean Margins. NOAA Technical Report OAR ARC, 2023, 23-10, pp. 76—83. DOI: 10.25923/fzwe-6432.
25. Angelopoulos M., Overduin P. P., Miesner F., Grigoriev M. N., Vasiliev A. A. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, 31, pp. 442—453. DOI: 10.1002/ppp.2061.
26. Vasiliev A. A., Oblogov G. E., Belova N. G. Submarine permafrost maps of the Russian Arctic. A Review. *Geography, Environment, Sustainability*, 2025, 3 (18), pp. 107—117. Available at: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2025-3966>.
27. Gavrillov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints. *The Cryosphere*, 2020, 14, pp. 1857—1873. DOI: 10.5194/tc-14-1857-2020.
28. Malakhova V. Modeling of the Arctic subsea permafrost thawing under possible climate warming. *Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023, 127804U. DOI: 10.1117/12.2688510.
29. Смирнов Ю. Ю., Матвеева Т. В., Щур Н. А. и др. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата // Криосфера Земли. — 2024. — Т. 28, № 5. — С. 38—59.
Smirnov Yu. Yu., Matveeva T. V., Shchur N. A. et al. Numerical modeling of subaqueous permafrost on the Eurasian Arctic shelf taking into account the zonality of the modern climate. *Earth's Cryosphere*, 2024, vol. 28, no. 5, pp. 38—59. DOI: 10.15372/kz20240504. (In Russian).
30. Матвеева Т. В., Чазов А. О., Смирнов Ю. Ю. Геологическая характеристика подмерзлотного газогидратного резервуара на Притаймырском шельфе Карского моря (Восточная Арктика, Россия) // Геотектоника. — 2024. — Вып. 2. — С. 84—108.
Matveeva T. V., Chazov A. O., Smirnov Yu. Yu. Geological characteristics of subpermafrost gas hydrate reservoir on the Taimyr Shelf of the Kara Sea (Eastern Arctic, Russia). *Geotectonic*, 2024, no 2, pp. 84—108. Available at: <https://doi.org/10.31857/S0016853X24020053>.
31. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. J. Brown, O. J. Ferrians, J. A. Heginbottom, E. S. Melnikov (eds.). Washington, DC., U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 1997. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000. Available at: <https://www.permafrost.org/data/>.

32. Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M., Shakhova N. 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 Petrol. Geol.*, 2023, vol. 157, pp. 1—11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106467>.
33. Кошурников А. В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований): Автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — М.: МГУ, 2023. — 45 с. Koshurnikov A. V. Permafrost of the shelf of the Russian Arctic seas (based on geophysical research data). Abstract of Doctoral thesis. Moscow, Moscow Univ., 2023, 45 p. (In Russian).
34. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Взрывная дегазация Земли на полуострове Ямал и прилегающей акватории Карского моря // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 2. — С. 177—191. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Explosive degassing of the Earth on the Yamal Peninsula and the adjacent Kara Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 177—191. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-2-177-191. (In Russian).
35. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Взрывная дегазация Земли на севере Западной Сибири: суша и прибрежные части Карского моря // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 162—176. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Explosive degassing of the Earth in the north of Western Siberia: land and coastal parts of the Kara Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 162—176. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-162-176. (In Russian).
36. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А., Гаврилов А. А. Аномально быстрый рост и взрыв Ямальского бугра газодинамического пучения C23 в 2020—2024 гг. // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 3. — С. 4—17. Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A., Gavrilov A. A. Anomalous rapid growth and explosion of the C23 Yamal gas-dynamic heaving mound in 2020—2024. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 3, pp. 4—17. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-3-4-17. (In Russian).
37. Богоявленский В. И., Янчевская А. С., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 42—55. Bogoyavlensky V. I., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V. Gas hydrates on the Circum-Arctic Region aquatories. *Arctic: Ecology and Economy*, 2018, no. 3 (31), pp. 42—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55. (In Russian).
38. Ильин Г. В. Гидрологический режим Обской губы как новой области морского природопользования в Российской Арктике // Наука юга России. — 2018. — Т. 14, № 2. — С. 20—32. Ilin G. V. Hydrological conditions of the Ob Bay as new area of maritime wildlife management in the Russian Arctic. *Science in the South of Russia*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 20—32. DOI: 10.23885/2500-0640-2018-14-2-20-32. (In Russian).
39. Portnov A., Smith A. J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf. *Geophysical Research Letters*, 2013, vol. 40, pp. 3962—3967. DOI: 10.1002/grl.50735.
40. 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. of Geophys. Research: Earth Surface*, 2015, 120, pp. 1515—1529. DOI: 10.1002/2015JF003467.
41. Мельников В. П., Спесивцев В. И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. — Новосибирск: Наука, 1995. — 198 с. Melnikov V. P., Spesivtsev V. I. Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara Seas. Novosibirsk, Nauka, 1995, 198 p. (In Russian).
42. Рекант П. В., Васильев А. А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород в Карском море // Криосфера Земли. — 2011. — Т. 25, № 4. — С. 72—75. Rekant P. V., Vasiliev A. A. Distribution of subaqueous permafrost in the Kara Sea. *Earth's Cryosphere*, 2011, vol. 25, no. 4, pp. 72—75. (In Russian).
43. Svendsen J. I., Alexanderson H., Astakhov V. I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23, pp. 1229—1271. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
44. Batchelor C. L., Margold M., Krapp M. et al. The configuration of Northern Hemisphere ice sheets through the Quaternary. *Nature Communications*, 2019, 10, 3713. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11601-2>.
45. Чувилин Е. М., Перлова Е. В., Баранов Ю. Б. и др. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения. — М.: ГЕОС, 2007. — 137 с. Chuvilin E. M., Perlova E. V., Baranov Yu. B. et al. Structure and properties of rocks in the cryolithozone of the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field. Moscow, GEOS, 2007, 137 p. (In Russian).
46. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на арктическом шельфе Восточной Сибири, Дальнего Востока (Россия) и Аляски (США) // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 478—487. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects on the Arctic shelf of Eastern Siberia, the Far East (Russia) and Alaska (USA). *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 478—487. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-478-487.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Кишанков Алексей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Казанин Алексей Геннадьевич, доктор экономических наук, кандидат технических наук, генеральный директор, АО «МАГЭ» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Рокос Сергей Игоревич, кандидат географических наук, ведущий геолог, АО «АМИГЭ» (183025, Россия, Мурманск, ул. Карла Маркса, д. 19), e-mail: rokossi@rusgeology.ru.

NEW INFORMATION ON SUBSEA PERMAFROST IN THE KARA SEA BASED ON SEISMIC REFRACTION DATA

Bogoyavlensky, V. I.¹, Kishankov, A. V.¹, Kazanin, A. G.², Rokos, S. I.³

¹ Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

³ Arctic Marine Engineering Geological Expeditions (Murmansk, Russian Federation)

For citing

Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., Rokos S. I. New information on subsea permafrost in the Kara Sea based on seismic refraction data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 4, pp. 480—494. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-4-480-494. (In Russian).

The article was received on September 20, 2025

Abstract

For the first time, a large volume of first-arrival records in common shot gathers was processed and comprehensively analyzed for an area of 620 thousand sq km in the Kara Sea, from 74 CDP seismic lines of JSC MAGE with a total length of approximately 11.5 thousand km. It was demonstrated that, in the best-studied South Kara Basin, the degradation of subsea relic permafrost (frozen ground) mainly has finished. However, permafrost with different levels of ice cementing has remained in 174 isolated patches. These data are consistent with previous findings by JSC AMIGE specialists based on drilling engineering-geological wells. For the insufficiently studied North Kara Basin, fundamentally new information was obtained on the complete absence of relic permafrost, which is radically different from all other research results, primarily based on mathematical modeling. A hypothesis has been proposed about possible reasons for the preservation of permafrost isolated patches in the South Kara Basin.

Key words: *Arctic, Kara Sea, CDP seismic survey, refracted waves, permafrost (frozen ground), permafrost isolated patches, gas hydrates.*

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Kishankov, Aleksei Vladimirovich, PhD of Geological and Mineralogical Science, Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Kazanin, Aleksey Gennadievich, Doctor of Economic Science, PhD of Engineering Science, Director General, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Rokos, Sergei Igorevich, PhD of Geography, Leading Geologist, Arctic Marine Engineering Geological Expeditions (19, Karl Marx St., Murmansk, Russia, 183025), e-mail: rokossi@rusgeology.ru.

© Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., Rokos S. I., 2025