

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ СУБАКВАЛЬНОЙ МЕРЗЛОТЫ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

В. И. Богоявленский<sup>1</sup>, А. В. Кишанков<sup>1</sup>, А. Г. Казанин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 августа 2023 г.

## Для цитирования

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. 501—515. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515.

Впервые для площади 454 тыс. км<sup>2</sup> моря Лаптевых проведены обработка и комплексный анализ большого объема записей первых вступлений преломленных волн сейсмограмм общего пункта взрыва по 113 сейсмопрофилям МОГТ АО МАГЭ общей протяженностью около 20,7 тыс. км. Получена принципиально новая информация о состоянии субаквальной криолитозоны, при этом выявлена граница между преимущественным распространением мерзлых и талых пород (Южная и Северная зоны). Обосновано, что ряд выявленных сквозных таликов в Южной зоне имеет эндогенный генезис и приурочен к крупным дизъюнктивным нарушениям. Высокая сейсмическая активность в центральной части моря Лаптевых улучшает их проницаемость, что способствует активизации субвертикальной миграции глубинных флюидопотоков и усиливает роль эндогенного фактора деградации мерзлоты и диссоциации газогидратов. Обнаружена крупная талая зона на северо-западном участке работ АО МАГЭ, подходящая близко к побережью Таймыра. Сопоставление полученных результатов с данными стратиграфической скважины DL-1, пробуренной в 2022 г. ФГБУ ВСЕГЕИ и АО «Росгеология» вблизи восточной границы моря Лаптевых, показало их полное соответствие, однозначно свидетельствующее о завершившейся деградации субаквальной мерзлоты на значительной части акватории морей Восточной Сибири.

**Ключевые слова:** море Лаптевых, сейсморазведка, преломленные волны, верхняя часть разреза (ВЧР), многолетне-мерзлые породы (ММП), талики, сипы газа, газовые гидраты.

## 1. Введение

В последнее десятилетие проблема глобальных изменений климата на Земле является одной из самых актуальных и широко обсуждаемых в мировом научном сообществе [1—6]. В многочисленных публикациях дается обоснование потепления климата с ростом концентраций парниковых газов, среди которых передовые места занимают углекислый газ и метан [1]. Сжигания в разных формах огромных объемов углеводородного топлива и пожары лес-

ных массивов дополняются эмиссией метана природного и антропогенного генезисов.

Одним из наиболее дискуссионных регионов с неоднозначным прогнозом объемов эмиссии метана в глобальном распределении ее источников является Арктика, особенно мелководные акватории Северного Ледовитого океана. При этом даются прогнозы об умеренных [1] и экстремально высоких объемах эмиссии метана [5; 6]. На основе последних можно выстроить причинно-следственную связь между деградацией подводной мерзлоты с разрушением газогидратов (ГГ) шельфа морей Восточной

Арктики, преимущественно состоящих из гидратов метана [5—7], и возможной «метановой катастрофой» [5]. Особая значимость газогидратной тематики также подтверждается большим интересом к ГГ как к возможному высокоперспективному источнику энергетических ресурсов будущего, а также возможной угрозой при освоении традиционных залежей углеводородов. Среди морей Северного Ледовитого океана большое внимание привлекает море Лаптевых, в центральной части дна которого обнаружена крупная зона сипов [5; 6; 8].

Согласно общепринятым представлениям, основными регионами возможного существования многолетнемерзлых пород (ММП) и сопутствующих им зон стабильности ГГ в Северном Ледовитом океане являются гигантские российские мелководные части (до 100—120 м) акваторий морей Восточной Сибири и Чукотки — моря Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское [5—16]. В последний ледниковый период эти части были низменной сушей, которая находилась в жестких субаэральных условиях.

В хорошо изученных регионах карты распространения ММП основаны на данных бурения и геофизических исследований, а в малоизученных регионах они в основном базируются на результатах цифрового моделирования, при котором важную роль играют ограниченный объем фактической информации о теплопроводности осадочных отложений и тепловом потоке Земли и/или их прогнозируемые значения [7; 9—15].

При цифровом моделировании [7; 10—13] наличие ММП на шельфе моря Лаптевых спрогнозировано местами до изобат около 100—120 м, а в отдельных районах (особенно в центральной части моря) до изобат 60—70 м. На официальном сайте Международной ассоциации вечной мерзлоты IPA (International Permafrost association) [9] приведена карта, на которой ММП существуют на большей части мелководного шельфа этих акваторий. Местами северная граница ММП проводится около и/или относительно близко к изобатам 100—120 м [9], однако в отдельных местах (в частности, в центральной части моря Лаптевых) она доходит до изобат 40—50 м. Подобной ситуацией с границами ММП и талых пород характеризуется карта, построенная при новом цифровом моделировании [14; 15].

Ограниченный объем данных о состоянии ММП акваторий восточных морей России делает высокозначимой любую новую информацию, базирующуюся на данных бурения или геофизических методов, признанных надежными для определения наличия или отсутствия ММП и, возможно, ГГ. На арктическом шельфе моря Бофорта Канады и Аляски среди методов сейсморазведки особенно хорошо зарекомендовал себя метод преломленных волн [17; 18].

В 2018 г. нами был выполнен прогноз потенциального распространения ГГ на акваториях Циркумарктического региона с основным вниманием к Северному Ледовитому океану, на мелководном

(до 120 м) шельфе которого в зонах существования субаквальных ММП имеются термобарические условия существования ГГ, нередко называемых криогенными ГГ [19; 20]. В последующие годы анализировались причины активной эмиссии газа в море Лаптевых [21] и были исследованы опасные газонасыщенные объекты в Восточно-Сибирском море [22]. Одновременно проводился первый этап исследований, направленных на рекогносцировочный анализ положения границы существования субаквальных ММП в морях Восточной Сибири на основе обработки данных сейсморазведки АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО МАГЭ) [23—27].

Основной целью данной работы является расширение районов исследований существования или отсутствия ММП и сопутствующих им ГГ в море Лаптевых в комплексе с ранее полученными данными авторов [23—25] и другими доступными материалами из открытых источников, включая результаты бурения.

## 2. Краткая информация о районе исследований

Геологическое строение и нефтегазоносность моря Лаптевых недостаточно изучены сейсморазведкой (плотность сети сейсмопрофилей — около 0,14 км/км<sup>2</sup>), что дополнительно усугубляется отсутствием глубоких скважин, пробуренных в открытой акватории [28, с. 39]. В 2017 г. с берега полуострова Хара-Тумус ПАО «Роснефть» была пробурена скважина Центрально-Ольгинская-1 (73,725° N, 109,61° E; забой 5523 м), открывшая в прибрежной части Хатангского залива в терригенных отложениях перми месторождение нефти с извлекаемыми запасами 81 млн т (категории C<sub>2</sub>+C<sub>1</sub>) [28; 29].

Большинство исследователей считает, что осадочный чехол моря Лаптевых имеет мел-найнозойский возраст [28; 30; 31]. В мелу — палеоцене сформировалась Лаптевоморская рифтовая система, в миоцене — плиоцене произошла дополнительная фаза активизации разломов рифтовой системы. Породы верхней части разреза (ВЧР, обычно это глубины до 500—900 м) и особенно придонных отложений (глубины до нескольких десятков метров, как правило, характеризуются слабой консолидацией), преимущественно сложены алеврито-глинистыми и песчаными плиоцен-четвертичными отложениями мощностью до 0,8—1,2 км [28, с. 61], залегание которых близко к горизонтально слоистому, что хорошо видно по данным сейсморазведки МОГТ АО МАГЭ.

Судя по обнажениям пород на полуострове Таймыр в горах Бырранга, акустический фундамент сложен палеозойским высокометаморфизованным комплексом, залегающим на кристаллическом фундаменте архей-протерозойского возраста [28; 31]. В центральной части моря Лаптевых глубина акустического фундамента достигает 11—14 км [28; 31].

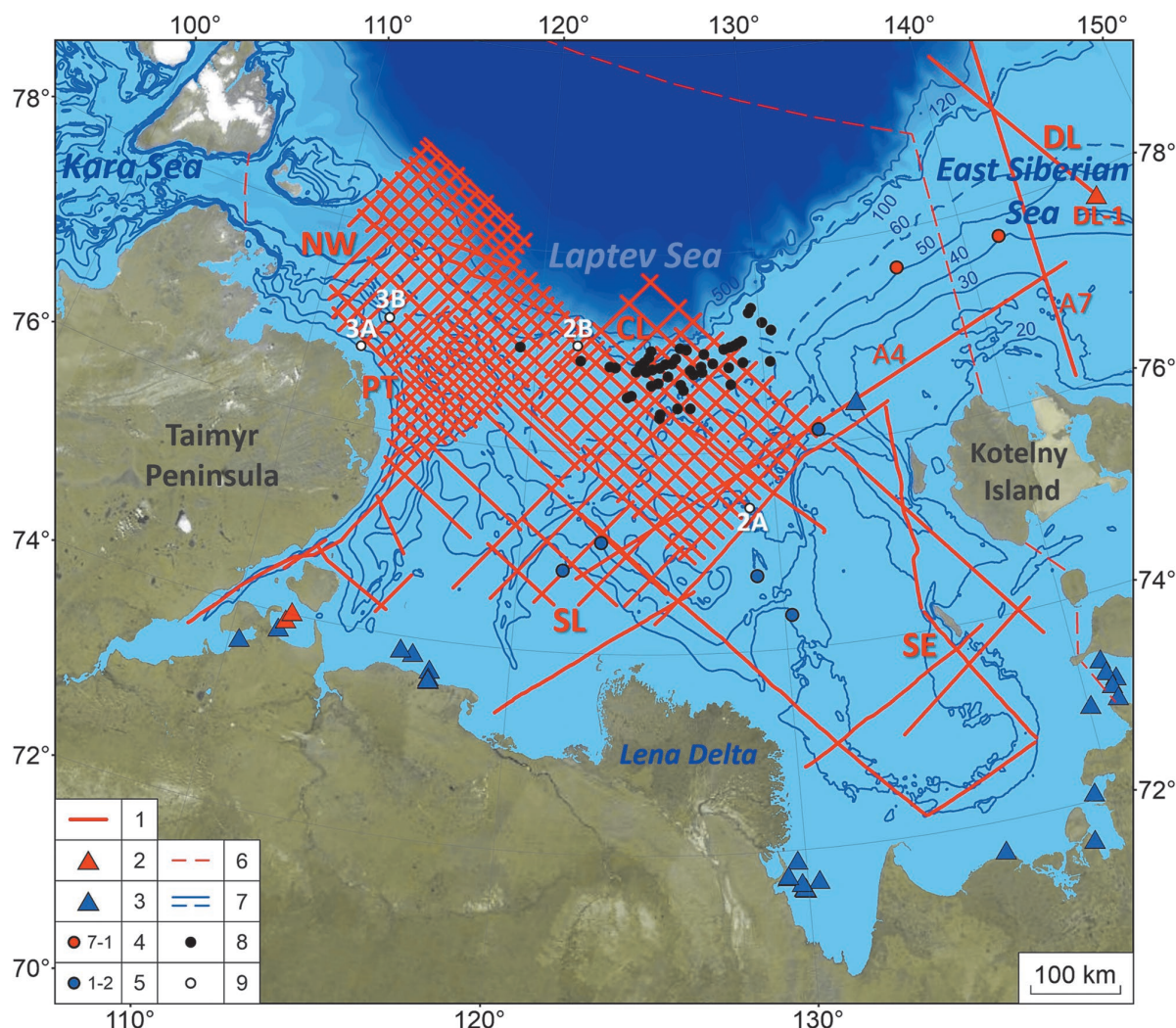


Рис. 1. Схема расположения изученных сейсмопрофилей АО МАГЭ в море Лаптевых. Обозначения: 1 – сейсмопрофили МОГТ, включая районы Центрально-Лаптевский (CL), Южно-Лаптевский (SL), Юго-восточный (SE), Притаймырский (PT), Северо-Западный (NW) и Де-Лонга (DL); 2 и 3 – отсутствие (2) и наличие (3) ММП по данным бурения скважин; 4 и 5 – отсутствие (4) и наличие (5) ММП по данным донных сейсмостанций ОВН [39; 40]; 6 – границы моря Лаптевых; 7 – изобаты в метрах (построены авторами на основе данных GEBCO); 8 – сипы газа [5; 6; 8]; 9 – сейсмограммы ОПВ, приведенные на рис. 2 (2А и 2В) и 3 (3А и 3В). Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок ESRI

Fig. 1. Scheme of the location of the studied seismic lines by JSC MAGE in the Laptev Sea. Legend: 1 – CDP seismic lines, including Central Laptev (CL), South Laptev (SL), South-Eastern (SE), Near-Taimyr (PT), North-Western (NW) and De Long (DL) areas; 2 and 3 – absence (2) and presence (3) of frozen ground based on drilling data; 4 and 5 – absence (4) and presence (5) of frozen ground based on ocean bottom hydrophone systems [39, 40]; 6 – boundaries of the Laptev Sea; 7 – isobaths in m (created by the authors based on GEBCO data); 8 – gas seeps; 9 – common shot gathers (CSGs), presented in figs. 2 (2A and 2B) and 3 (3A and 3B). Basis of the figure – GEBCO bathymetry and ESRI satellite image

Регион моря Лаптевых с прилегающей сушей является самой сейсмоактивной зоной в российской Арктике [32; 33]. Это обусловлено геодинамическими процессами на стыке Евразийской и Северо-Американской тектонических плит. Здесь на широте от 69,7° до 79,4° в 1927—2019 гг. было зафиксировано 28 землетрясений с магнитудой выше 5,0, при этом магнитуда четырех из них была в диапазоне 6,0—6,7 [27; 33]. Высокая сейсмичность делает системы разломов и субвертикальных трещин хорошо проницаемыми для вертикальной миграции газа.

Дно мелководного шельфа представляет собой полого наклоненную к северу равнину, на которой выделяются пять палеодолин русел рек Хатанга, Анабар, Оленёк, Лена и Яна (в порядке с запада на восток) [34].

Процессы формирования и деградации ММП зависят от ряда факторов, включая теплопроводность осадочных отложений, тепловой поток Земли и температуры придонного слоя воды. Субаквальная мерзлота охватывает широкий комплекс пород ВЧР, по аналогии с сушей ее мощность в отдельных районах может достигать и даже превышать 600—700 м



Таблица 1. Геофизическое оборудование при проведении стандартных сейсморазведочных работ МОГТ АО МАГЭ 1985—2014 гг.

Table 1. Geophysical equipment used in CDP seismic survey by JSC MAGE in 1985—2014

Район	Судно	Расстояние между ПВ, м	Количество каналов (ПП)	Расстояние между ПП, м	Вынос первого ПП от ПВ, м
Центрально-Лаптевский — CL	ГДН и ПК	37,5	648	12,5	120—130
Южно-Лаптевский — SL	ПК	25	324	12,5	167,25
Притаймырский — PT	ГДН	37,5	648	12,5	130
Северо-Западный — NW	ГДН и НТ	37,5	648	12,5	130
Юго-Восточный — SE	НТ	37,5	648	12,5	130
Региональный профиль А4	ГДН	37,5	648	12,5	130
Архивные профили 1986 г.	ГДН	50	12	100	425
Архивные профили 1985 и 1987 гг.	Г	50—100	24	50	225—300

**Примечание.** ГДН — «Геолог Дмитрий Наливкин», ПК — «Профессор Куренцов», НТ — «Николай Трубятчинский», Г — «Геофизик»; ПВ — пункт взрыва, ПП — пункт приема.

[7; 13; 16]. Большое влияние на состояние субаквальных ММП на шельфе моря Лаптевых оказывают реки Лена и Яна, обеспечивающие значительный приток тепла с пресной водой, влияющей на соленость моря, а также на процессы термохалинной циркуляции и формирования льда [35].

В море Лаптевых основной объем воды (ежегодно порядка 500—542 км<sup>3</sup>, или 71—77%) приносит река Лена, являющаяся самой протяженной (около 4400 км) и крупной рекой в Восточной Сибири [36; 37]. По данным дистанционного зондирования Земли ее ширина вблизи дельты достигает 2,5—3 км (местами даже около 7 км), размеры дельты — 140×260 км, а ее площадь — около 29,6 тыс. км<sup>2</sup> [36]. Во времена последнего ледникового периода (17—15 тыс. лет назад) уровень моря был значительно (около 120 м) ниже современного, и дельта Лены «располагались в сотнях километров к северу от современного ее конуса выноса» [36]. На континентальной суше Лена полностью расположена в зоне существования ММП, однако на ряде участков реки существуют подрасовые сквозные талики [38], что важно для понимания возможной субаквальной обстановки в море Лаптевых.

### 3. Методы и материалы исследований

При изучении распространения реликтовых и деградировавшихся (талых) ММП в море Лаптевых использованы записи первых вступлений преломленных волн, регистрирующиеся на сейсмограммах общего пункта взрыва (ОПВ — общий пункт возбуждения упругих колебаний пневмоисточником) при проведении стандартных сейсморазведочных работ МОГТ АО МАГЭ в 1985—2014 гг. научно-исследовательскими судами «Профессор Куренцов», «Гео-

лог Дмитрий Наливкин», «Николай Трубятчинский» и «Геофизик». Основные характеристики систем наблюдений приведены в табл. 1. Более подробная информация приведена в [21—23].

В районах распространения слабо консолидированных пород ВЧР регистрация высокоскоростных преломленных волн указывает на присутствие ММП и/или ГГ, имеющих схожие физические характеристики [13; 14]. Подобный анализ выполнялся ранее по канадскому и американскому секторам моря Бофорта [17; 18], а также авторами в предыдущих исследованиях в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском [21—27].

Для унификации результатов согласно исследованиям на шельфе Аляски [18] минимальным значением скорости, указывающим на наличие льдонасыщенных отложений, было принято 2,3 км/с (обосновано данными каротажа скважин), а использованное второе граничное значение 2,8 км/с разделяет мерзлые породы по уровню льдонасыщения (цементации) на менее и более льдонасыщенные [18], что зависит от уровня отрицательных температур. Достоверность результатов исследований распространения субаквальных ММП по записям преломленных волн подтверждается данными исследованной ряда глубоких скважин, в том числе на шельфе Аляски в море Бофорта [18]. Анализ скоростей регистрируемых преломленных волн в зоне перехода от мерзлых к талым породам в море Лаптевых показывает, что они также могут существовать и в диапазоне порядка 2,0—2,3 км/с, которому, видимо, соответствуют породы с существенно деградированной мерзлотой.

Расчет скоростей распространения преломленных волн по сейсмограммам ОПВ проведен в программ-

ном обеспечении (ПО) RadExPro (компания «Деко-геофизика», Россия). Картографические построения, иллюстрирующие распространение значений скоростей преломленных волн в районе исследования, выполнены в ПО ArcGIS (компания ESRI, США). Расчеты площадей прогнозного распространения талых и мерзлых пород на акваториях арктических морей выполнены в ПО ArcGIS на основе Общей батиметрической карты океанов GEBCO (<https://www.gebco.net/>).

Кроме того, были проведены аналитические исследования большого объема доступной информации, включая данные сейсморазведки и бурения. В частности, проанализированы данные сейсморазведки, проведенной в 1997 г. ВГР совместно с трестом СМНГ («Севморнефтегеофизика») с применением семи донных сейсмостанций (ОВН — Ocean Bottom Hydrophone systems) [39; 40]. Собраны, проанализированы и загружены в геоинформационную систему результаты бурения в море Лаптевых более 30 инженерно-геологических скважин, большинство которых вскрыли ММП [28; 34; 36; 41; 42 и др.]. В частности, по профилю скважин «Мамонтов клык» ММП были вскрыты на удалениях от берега до 11 км [36]. Также использованы данные стратиграфической скважины DL-1, пробуренной в 2022 г. ФГБУ ВСЕГЕИ и АО «Росгеология» при содействии ПАО НК «Роснефть» вблизи восточной границы моря Лаптевых и показавшей отсутствие ММП при глубине моря 47,5 м (см. раздел 5) [43].

#### 4. Результаты исследований

На основе исследований в море Лаптевых проведены анализ и обработка полевых сейсмических материалов МОГТ в суммарном объеме 20,71 тыс. пог. км, полученных АО МАГЭ в нескольких районах, а также по отдельным региональным сейсмопрофилям, включая:

- Центрально-Лаптевский район — CL (2009 г., 28 сейсмопрофилей, 5930 км);
- Южно-Лаптевский район — SL (2005 г., 9 сейсмопрофилей, 1370 км);
- Притаймырский район — PT (2011—2012 гг., 38 сейсмопрофилей, 5450 км);
- Северо-Западный район — NW (2012—2014 гг., 27 сейсмопрофилей, 4480 км);
- Юго-Восточный район — SE (2014 г., 2 сейсмопрофиля, 530 км);
- Архивные данные по Южно-Лаптевскому району (1985—1987 гг., 8 сейсмопрофилей, 2290 км);
- Региональный сейсмопрофиль — А4 (2007 г., 660 км).

Таким образом, дополнительно к обработке 28 сейсмопрофилей по Центрально-Лаптевскому участку (CL) и профилю А4, выполненной в 2021—2022 гг. [21—25], в настоящей работе была проведена обработка 14,12 тыс. пог. км 84 новых сейсмопрофилей в море Лаптевых. Кроме того, для полноты картины в северо-восточной части моря

Лаптевых к работе привлечены два сейсмопрофиля из приграничного района поднятия Де-Лонга в северо-западной части Восточно-Сибирского моря [26; 27]. Их высокая значимость для настоящего исследования обусловлена бурением в 2022 г. скважины DL-1, расположенной в южной части сейсмопрофиля DL1101 АО МАГЭ [43]. В итоге общее количество обработанных и проанализированных сейсмопрофилей составило 113.

На первом этапе исследований был проанализирован характер волновых полей временных разрезов МОГТ и полевых сейсмограмм ОПВ. По результатам анализа отражающие и преломляющие сейсмические горизонты в ВЧР на мелководном шельфе (от берега до изобат 120—150 м) имеют преимущественно пологое, местами слегка наклоненное к северу строение, близкое к горизонтально-слоистому. На сейсмограммах ОПВ повсеместно в начальных частях регистрации упругих колебаний отчетливо видны прямые волны, распространяющиеся в толще воды со скоростью около 1,43 км/с (годограф — зеленый пунктир), с отраженными и преломленными волнами от ряда горизонтов осадочного чехла (рис. 2).

Основным отличием большей части рассмотренных сейсмограмм ОПВ в море Лаптевых является наличие или отсутствие высокоскоростных (от 2,3 до 4,0 км/с) преломленных волн от горизонтов в ВЧР (преимущественно от горизонта вблизи дна) (рис. 2А и 2В) [26; 27]. В частности, в юго-восточной части профиля LS0907 (рис. 2А) наблюдаются преломленные волны от акустически жесткого горизонта (годограф — красный пунктир), связанного с кровлей ММП на глубине около 20 м от дна моря. Эти преломленные волны прослеживаются только на небольших удалениях от ПВ (в основном до 1,5—2,0 км) и в примере рис. 2А имеют скорость 3,3 км/с. Отмеченные особенности преломленных волн в море Лаптевых хорошо согласуются с данными по морям Бофорта [18] и Восточно-Сибирскому [26; 27] и могут быть объяснены более быстрым затуханием сейсмических волн, распространяющихся в мерзлых породах, по сравнению с геологическими горизонтами слабо консолидированных отложений в ВЧР в обычно незамерзшем состоянии. Преломленные волны от придонных мерзлых пород существенно отличаются от преломленных волн от залегающих глубже незамерзших пластов в ВЧР, которые для района CL имеют граничные скорости около 2,1 и 2,4 км/с и прослеживаются до больших удалений от ПВ практически на всей сейсмограмме ОПВ (см. рис. 2В). Таким образом, в южной части профиля LS0907 наблюдаются высокоскоростные преломленные волны от кровли ММП, а в его северной части их нет, что означает отсутствие ММП.

Сейсмограммы ОПВ в западной части моря Лаптевых в Северо-Западном (NW) и Притаймырском (PT) районах существенно отличаются от рассмо-

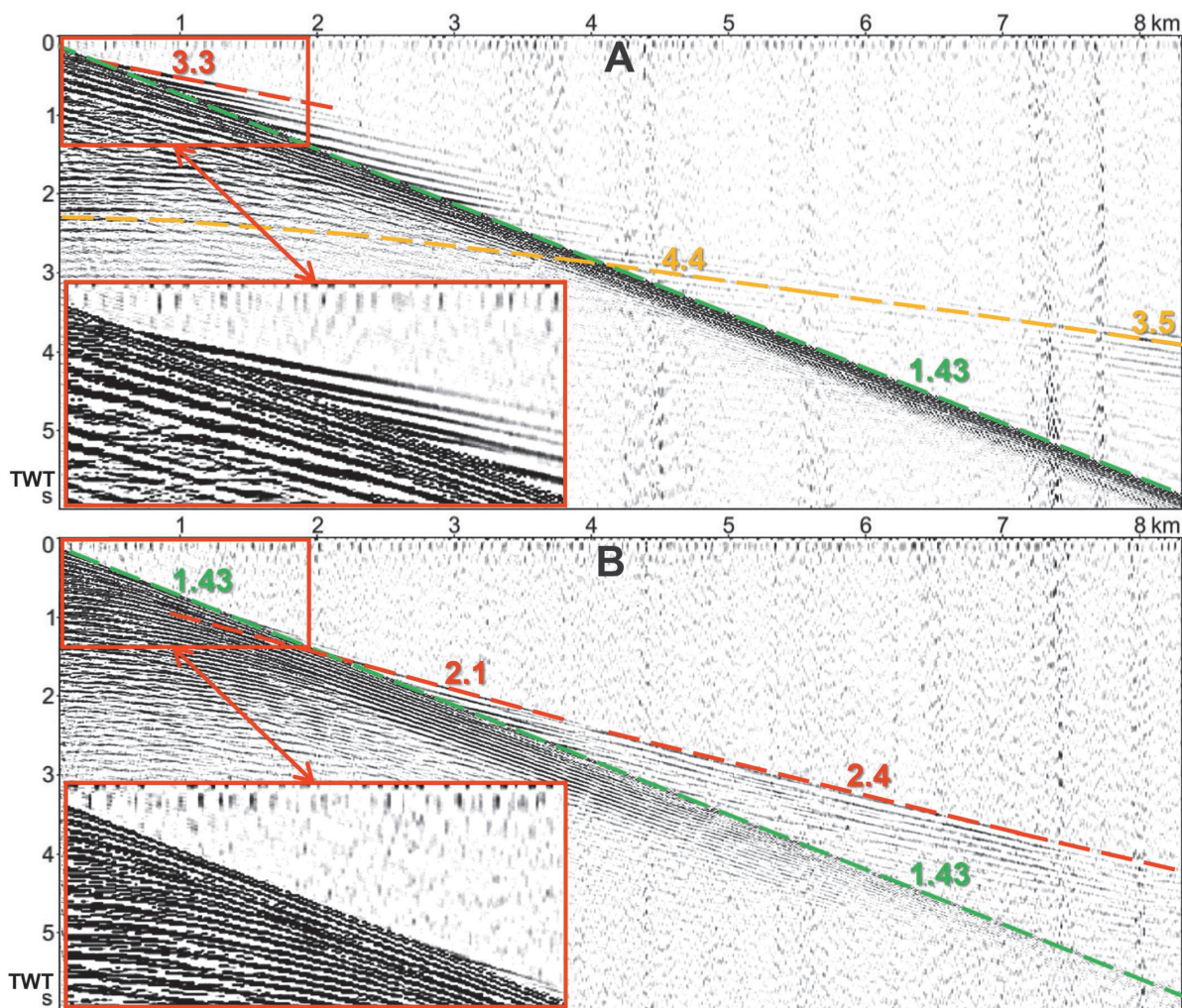


Рис. 2. Сейсмограммы ОПВ в юго-восточной (А) и северо-западной (В) частях профиля LS0907 в Центрально-Лаптевском районе моря Лаптевых (CL) с увеличенными фрагментами. Примечания: длина сейсмокося – 8,1 км, вынос – 130 м, точки возбуждения ОПВ (А, В) показаны на рис. 1 (2А, 2В)  
 Fig. 2. CSGs in the south-eastern (A) and north-western (B) parts of the LS0907 line in the Central Laptev area of the Laptev Sea (CL) with enlarged fragments. Comments: length of the streamer – 8.1 km; offset from the shot point – 130 m; shot points of the CSGs are shown in fig. 1 (2A, 2B)

тренных выше (район CL) наличием преломленных волн от разновозрастного гетерогенного акустического фундамента [28] с очень высокими скоростями распространения, в основном, от 4,5 до 5,5 км/с, которые, постепенно затухая, прослеживаются до удалений 8,1 км (рис. 3). Эти волны выделяются как вблизи от берега Прончищева в ВЧР на малых глубинах от дна (рис. 3А, скорость 5,3 км/с), так и глубже на больших удалениях к северу от этого берега (рис. 3В, скорость 4,5 км/с). На рис. 3В в интервале от ПВ 450—2400 м в первых вступлениях хорошо видны преломленные волны от геологического горизонта на глубине около 300 м предположительно плиоценового возраста с граничной скоростью около 2,2 км/с. Отметим, что на сейсмограмме ОПВ рис. 3А они также выделяются, но в первых вступлениях видны лишь на удалениях от ПВ примерно 400—750 м. На рис. 3В преломленные волны от акустического фундамента, залегаю-

щего на глубине около 900 м, имеют скорость около 4,5 км/с. Преломленные волны от горизонтов, отождествляемых нами с ММП и/или ГГ, встречались преимущественно в юго-восточной части района РТ вблизи берега Прончищева недалеко от Хатангского залива.

При анализе волновых полей и расчете скоростей преломленных волн результаты подразделялись на три части согласно описанию, приведенному в разделе 3. При этом к сцементированным в разной степени льдом были отнесены породы в ВЧР, для которых скорости преломленных волн составили 2,3—4,0 км/с [18], что зависит от уровня отрицательных температур. Отметим, что большей частью (порядка 73%) расчетные значения скоростей были в диапазоне 2,8—4,0 км/с, а преломленные волны со скоростями 2,3—2,8 км/с были обнаружены в переходных зонах между сильно сцементированными и тальми породами, возможно, включая участки су-



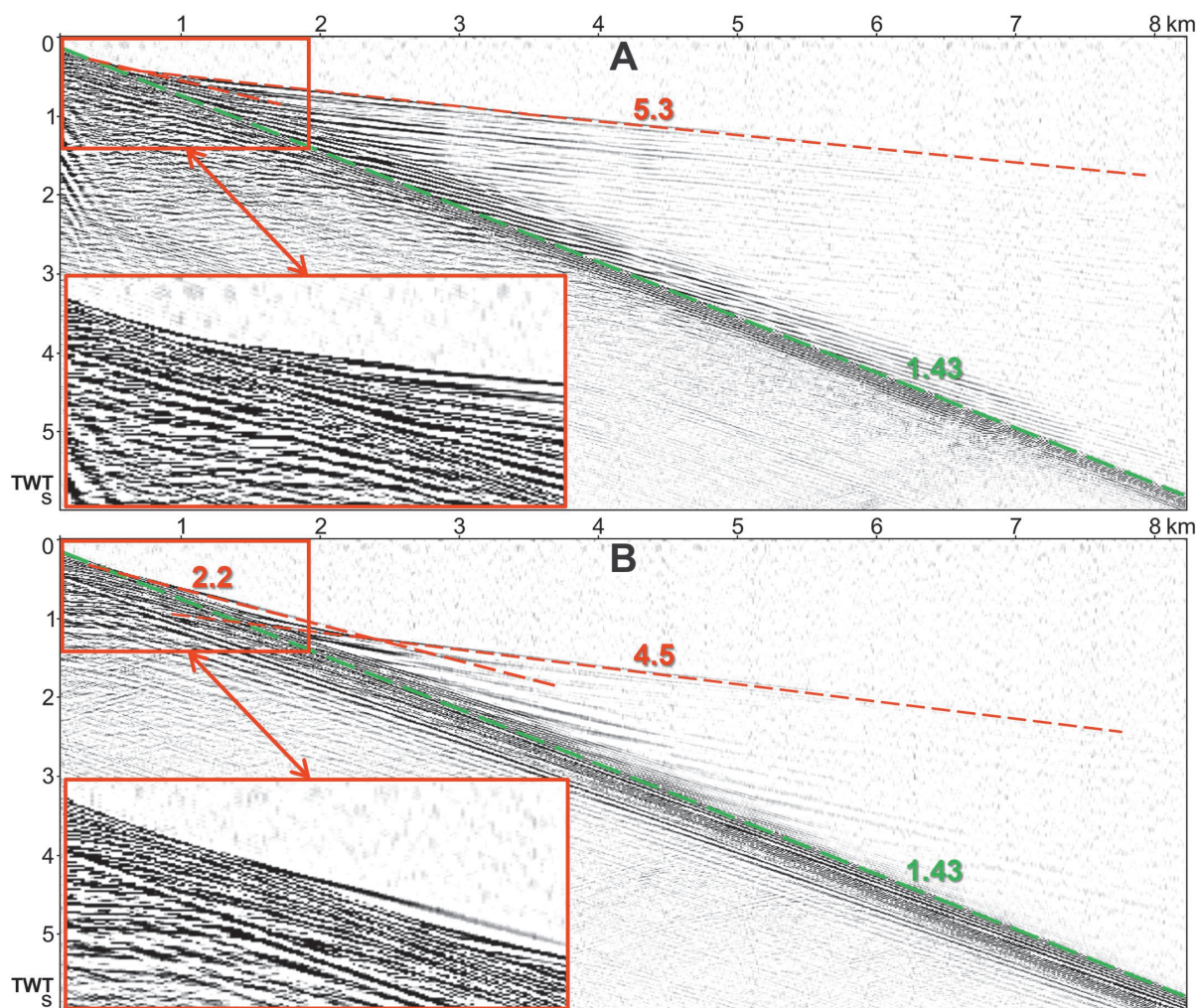


Рис. 3. Сейсмограммы ОПВ в юго-западной части профиля NW1304 в Северо-Западном районе моря Лаптевых (NW) (А и В) с увеличенными фрагментами. Примечания: длина сейсмокосы – 8,1 км, вынос – 130 м; точки возбуждения ОПВ (А, В) показаны на рис. 1 (3А, 3В)

Fig. 3. CSGs in the south-western part of the NW1304 line in the North Western area of the Laptev Sea (NW) (A and B) with enlarged fragments. Comments: length of the streamer – 8.1 km, offset from the shot point – 130 m; shot points of the CSGs are shown in fig. 1 (3A, 3B)

ществования несквозных таликов. Сквозные талики характеризуются отсутствием высокоскоростных преломленных волн.

На рис. 4 приведена результирующая картографическая схема, на которой с помощью цветовой кодировки приведены результаты анализа физического состояния пород ВЧР в районах исследований сейсморазведкой МОГТ АО МАГЭ в море Лаптевых и в северо-западной части Восточно-Сибирского моря.

В результате анализа волновых полей сейсмограмм ОПВ в исследованных частях акватории моря Лаптевых обнаружены и со значительным уровнем детальности закартированы обширные районы наличия, а также отсутствия высокоскоростных (2,3—4,0 км/с) преломленных волн от границ в ВЧР, свидетельствующие соответственно о существовании или отсутствии изменений их физических свойств за счет цементирующего влияния ММП и, возможно, ГГ.

## 5. Обсуждение результатов

Результаты исследований регионального уровня в мелководной (до 120 м) части моря Лаптевых (см. рис. 4) охватили площадь 454 тыс. км<sup>2</sup> (см. рис. 1 и 4), что на 36,7% больше, чем в предыдущих наших работах 2021—2022 гг. (332,2 тыс. км<sup>2</sup>) [26; 27]. На основе новых исследований (см. рис. 4) составлена картографическая схема распространения мерзлых и талых пород в пределах шельфа моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря, приведенная на рис. 5.

Согласно картографической схеме рис. 5 определено, что ММП и/или ГГ существуют примерно на 324,7 тыс. км<sup>2</sup>, а на площади около 89,2 тыс. км<sup>2</sup> они деградировали. Отдельные районы в прибрежных частях, в которых отсутствуют данные сейсморазведки и/или получены неоднозначные результаты ее анализа, выделены нами как «серая зона», требующая дополнительного изучения. В частности, к ним



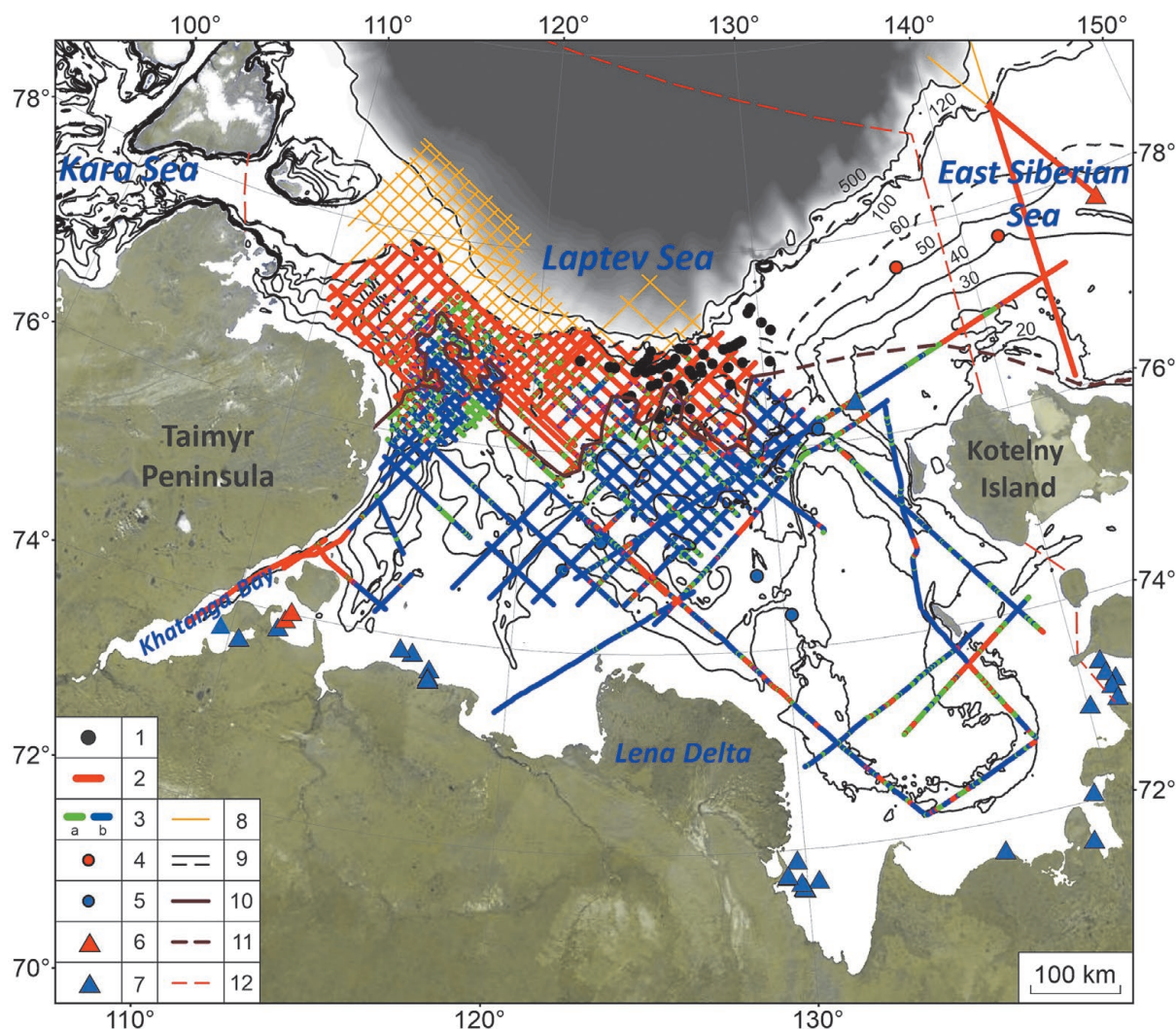


Рис. 4. Результаты анализа состояния придонных отложений в районах исследований сейсмозаземкой МОГТ АО МАГЭ в море Лаптевых и северо-западной части Восточно-Сибирского моря. Обозначения: 1 – сипы газа [5; 6; 8], 2 – отсутствие преломленных волн в придонных отложениях или их скорости менее 2,3 км/с, 3 – существование преломленных волн в придонных отложениях с кажущимися скоростями 2,3–2,8 км/с (а) и 2,8–4,0 км/с (б), 4 и 5 – отсутствие (4) и наличие (5) ММП по данным донных сейсмостанций [39; 40], 6 и 7 – отсутствие (6) и наличие (7) ММП по данным бурения скважин, 8 – участки сейсмопрофилей на глубинах моря свыше 120 м, 9 – изобаты в метрах (построены авторами на основе данных GEBCO), 10 и 11 – прогнозируемые границы распространения ММП уверенные (10) и требующие дополнительных исследований (11), 12 – границы моря Лаптевых. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок ESRI

Fig. 4. Results of an analysis of near-bottom deposits state in the areas studied with CDP seismic by JSC MAGE in the Laptev Sea and the north-western part of the East Siberian Sea. Legend: 1 – gas seeps [5, 6, 8], 2 – absence of refracted waves in near-bottom deposits (or their velocities are lower than 2.3 km/s), 3 – refracted waves with apparent velocities of 2.3–2.8 km/s (a) and 2.8–4.0 km/s (b), 4 and 5 – absence (4) and presence (5) of frozen ground based on ocean bottom hydrophone (OBH) systems [39, 40], 6 and 7 – absence (6) and presence (7) of frozen ground based on drilling data, 8 – parts of seismic lines at seafloor depths greater than 120 m, 9 – isobaths in m (created by the authors based on GEBCO data), 10 and 11 – forecasted boundaries of frozen ground distribution: accurately defined (10) and requiring additional study (11), 12 – boundaries of the Laptev Sea. Basis of the figure – GEBCO bathymetry and ESRI satellite image

были отнесены крупный Хатангский залив и мелкие узкие заливы общей площадью около 40,1 тыс. км<sup>2</sup>. С учетом этого на данном этапе изученности обосновано, что ММП деградировали преимущественно в северной части моря Лаптевых примерно на 21,6% достаточно хорошо исследованной акватории. Отметим, что на предыдущем этапе изученности этот показатель был 18,8% [26; 27]. При этом в талой зоне выявлены небольшие участки, идентифициро-

ванные нами как останцы ММП («островная мерзлота») и/или ГГ. Судя по предварительным данным, доля деградировавших ММП и диссоциировавших ГГ в море Лаптевых значительно ниже, чем в западной части Восточно-Сибирского моря, где она составляет порядка 62,2% [26; 27].

Судя по всему, вблизи поднятий фундамента в Северо-Западном (NW) и частично в Притаймырском (PT) районах в море Лаптевых, а также южнее под-



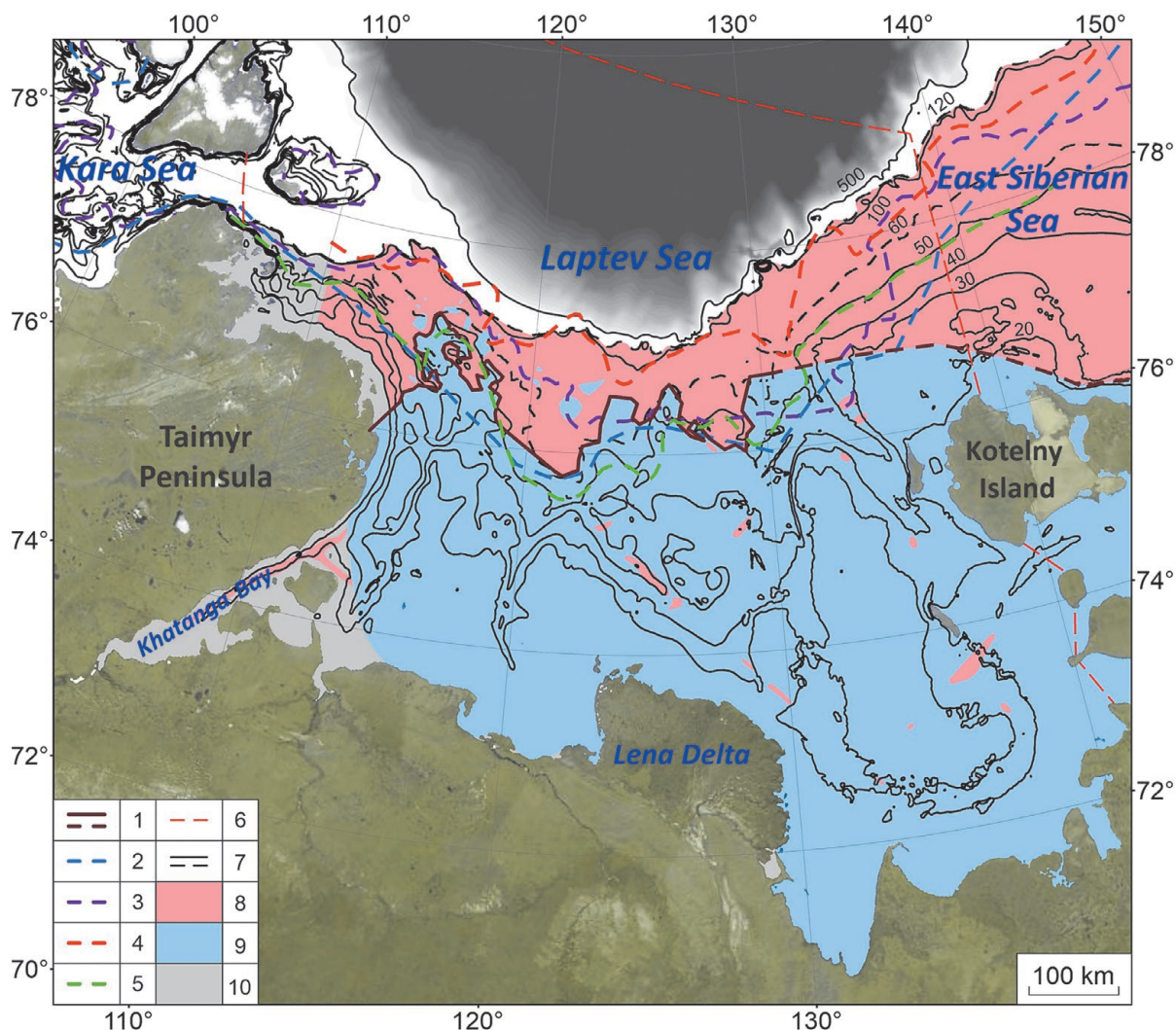


Рис. 5. Сопоставление зон распространения мерзлых и талых пород в пределах шельфа моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря.

Обозначения: границы преимущественно мерзлых и талых пород, выделенные по данным: 1 – авторов данной статьи, 2 – J. Brown с соавторами [9], 3 – P. Overduin и M. Angelopoulos с соавторами [14; 15], 4 – Н. Н. Романовского и В. Е. Тумского [13], 5 – Т. В. Матвеевой с соавторами [7]; 6 – граница моря Лаптевых; 7 – изобаты (м); 8 – зона прогнозируемого преимущественного отсутствия ММП (талые породы), 9 – зона прогнозируемого преимущественного существования ММП, 10 – «серая зона» (недостаток информации)

Fig. 5. Zones of frozen and thawed ground distribution on the shelf of the Laptev Sea and the western part of the East Siberian Sea. Legend: boundaries of predominantly frozen and thawed ground, distinguished by: 1 – authors of this paper, 2 – J. Brown with coauthors [9], 3 – P. Overduin and M. Angelopoulos with coauthors [14; 15], 4 – N. N. Romanovskii and V. E. Tumskoi [13], 5 – T. V. Matveeva with coauthors [7]; 6 – boundary of the Laptev Sea; 7 – isobaths (m); 8 – zone of forecasted prevailing absence of frozen ground, 9 – zone of forecasted prevailing presence of frozen ground, 10 – “grey zone” (lack of information)

нения Де-Лонга (DL) в Восточно-Сибирском море талые зоны подходят относительно близко к берегу (см. рис. 4 и 5). Точная граница талых и мерзлых пород здесь не определена в связи с обработкой сейсмопрофилей преимущественно на глубинах моря более 20–30 м. Весьма вероятно, что в этих районах ММП деградировали до изобат около 20 м, как и в море Бофорта на шельфе Аляски [18], или даже менее. В связи с этим вблизи побережья Таймыра не охваченные сейсморазведкой АО МАГЭ относительно узкие прибрежные полосы (в основном шириной 5–15 км) до изобат 20 м условно показаны как «се-

рая зона». Возможно, что в этих районах ММП будут существовать до 4 км от берега, как это было показано по данным бурения с припайного льда и электроразведки в 2017 г. в бухте Нордвик (отметим, что скважины могли не достичь ММП из-за небольших глубин бурения) [16; 42]. Столь сильную деградацию субаквальных ММП вблизи полуострова Таймыр можно объяснить повышенным тепловым потоком за счет близости пород фундамента к поверхности дна. Дополнительным фактором может быть близость к Таймыру континентального склона, к которому вплотную подходят относительно теплые воды,

привносимые в Северный Ледовитый океан Северо-Атлантическим течением, что показано в нашей работе [20, рис. 4].

В зоне преимущественного распространения ММП выделяется ряд таликов разного генезиса. Особено отметим протяженный (более 60 км) талик, явно приуроченный к палеоруслу Лены. Не вызывает сомнений, что талики (сквозные и/или несквозные) также имеются в Хатангском заливе. Результаты электроразведки [44] позволили сделать вывод, что в заливе вокруг полуострова Хара-Тумус и юго-западнее ММП существуют, но их кровля в центральной части залива находится на глубине до 240 м от дна, «а в северо-восточной части Хатангского залива толща ММП полностью отсутствует... Мерзлые породы также отсутствуют в центральной части бухты Нордвик». Отметим, что одно из крупных дизъюнктивных нарушений к северу от острова Бегичев, показанных на картографической схеме [31, рис. 6], точно совпадает с талой зоной, выделенной при анализе преломленных волн по сейсмопрофилю РТ1101. Наши данные в северной части залива вблизи острова Бегичев (см. рис. 4) хорошо согласуются с данными электроразведки [44], но юго-западнее они им противоречат. Возможно, что это связано с близостью к дну консолидированных пород, от которых высокоскоростные преломленные волны маскируют эффект влияния ММП. В связи с этим на текущем этапе исследований Хатангский залив в целом показан на рис. 5 как «серая зона», но талая зона к западу и северу от острова Бегичев отмечена как надежно выделенная.

Особо отметим, что в сентябре 2022 г. достоверность выполненного нами прогноза по записям преломленных волн была подтверждена данными бурения стратиграфической скважины DL-1 на поднятии Де-Лонга в северо-западной части Восточно-Сибирского моря вблизи границы с морем Лаптевых (77,753361° N, 146,6321214° E) [43]. Скважина DL-1 пробурена на глубине моря 47,5 м, имеет забой 472 м от поверхности дна в юрско-меловых отложениях и расположена непосредственно в южной части сейсмопрофиля МОГТ DL1101 АО МАГЭ. Добурения скважины на профиле DL1101 в связи с отсутствием высокоскоростных преломленных волн от придонных отложений авторами было обосновано отсутствие ММП и ГГ [26; 27], позднее подтвержденное скважиной DL-1 [43].

Также отметим, что достоверность результатов исследований распространения субаквальных ММП по записям преломленных волн подтверждается данными изучения ряда глубоких скважин в море Бофорта на шельфе Канады [17] и Аляски [18].

На рис. 5 кроме построенной нами границы между ММП и тальми породами (1) для сравнения дополнительно показано положение четырех аналогичных по сути границ, спрогнозированное на основе цифрового моделирования в работах коллег: J. Brown с соавторами — 2 [9], P. Overduin и M. Angelopoulos с соавторами — 3 [14; 15], Н. Н. Романовского

и В. Е. Тумского — 4 [13], Т. В. Матвеевой с соавторами — 5 [7]. Среди общей закономерности можно отметить примерное совпадение (на качественном уровне) положения трех границ в центральной части моря Лаптевых [7; 9; 14; 15], отображающее значительную деградацию ММП. Это, видимо, обусловлено заданием авторами этих моделей примерно одинаковых больших значений теплового потока в этой части. Обоснованием для этого служат фактические данные и единое представление о ее глубинном строении, включая значительную деструкцию осадочного чехла дизъюнктивными нарушениями Лаптевоморской грабен-рифтовой зоны, а также близостью южного примыкания хребта Гаккеля. Здесь расчетные границы находятся в относительной близости к границе, построенной нами при обработке и анализе сейсмограмм ОПВ (см. рис. 5). Высокая сейсмическая активность в этом районе улучшает проницаемость дизъюнктивных нарушений, что способствует активизации субвертикальной миграции глубинных флюидопотоков и усиливает роль эндогенного фактора деградации ММП и/или ГГ. Подтверждением сказанному служат результаты геохимических исследований, показавшие преобладание метана глубинного генезиса на многих участках акватории [40; 45]. Высокий уровень газонасыщенности придонных отложений подтверждается тем, что из многих пробуренных на мелководье шельфа моря Лаптевых неглубоких скважин были зафиксированы продолжительные (до получаса) выходы газа [46].

В западной и восточной частях моря Лаптевых наблюдается взаимный диссонанс между модельными границами [7, 9, 13—15], при этом их положение значительно, а в ряде мест кардинально отличается и от нашей границы. По нашим данным, к северу от островов Котельный и Новая Сибирь ММП деградировали вплоть до изобат около 20 м (см. рис. 4 и 5). При этом значительная часть замеров температур придонных вод показала положительные значения [21, рис. 8], а на поднятии Де-Лонга и к северу от острова Котельный замеры теплового потока показали повышенные значения, местами доходящие до 100—110 мВт/м<sup>2</sup> [27, рис. 1]. Отметим, что в Восточно-Сибирском море наши предварительные построения показали еще большие региональные отличия от всех рассмотренных модельных построений [7; 9; 13—15]. Кроме того, полученные нами результаты исследований распространения ММП на мелководном шельфе морей Восточной Сибири кардинально отличаются от расчетов на основе анализа распространения придонных температур, в которых «ледоносная вечная мерзлота на шельфе Сибирской Арктики простирается от береговой линии до глубины моря 80—100 м», а «ее остатки могут локально существовать на глубине моря в пределах 120 м» [47]. Однако обсуждение причин таких отличий не является целью рассмотрения в данной работе.



## 6. Заключение

На данном этапе изучения распространения мерзлых и талых пород в море Лаптевых [23—25] впервые в большом объеме (около 20,7 тыс. км) проведены обработка и комплексный анализ записей первых вступлений преломленных волн сейсмограмм ОПВ по 113 сейсмопрофилям МОГТ АО МАГЭ. При этом исследованиями от берега до изобаты 120 м была охвачена площадь 454 тыс. км<sup>2</sup>. Полученные результаты были дополнены данными других работ, включая бурение неглубоких скважин.

Сопоставление полученных результатов с данными стратиграфической скважины DL-1, пробуренной в 2022 г. ФГБУ ВСЕГЕИ и АО «Росгеология» при содействии ПАО НК «Роснефть» вблизи восточной границы моря Лаптевых при глубине моря 47,5 м [43], показало их полное соответствие, однозначно свидетельствующее о завершившейся деградации субаквальной мерзлоты на значительной части акватории морей Восточной Сибири.

В результате комплексных исследований на мелководном шельфе моря Лаптевых получена принципиально новая информация о состоянии субаквальной криолитозоны. При этом выделены две крупные зоны — южная и северная.

В Южной зоне породы ВЧР преимущественно находятся в мерзлом состоянии. В ней выделяются участки отсутствия ММП (талики) разного размера и конфигурации. В центральной и западной частях мелководного шельфа закартированы два относительно крупных протяженных участка талых пород, наиболее вероятно, связанных с палеорулами рек Лена и Хатанга и, возможно, с глубинными разломами с аномальными тепловыми потоками, к которым были приурочены эти палеорула. Весьма вероятно, что ряд других выявленных сквозных таликов также имеет эндогенный генезис и приурочен к крупным дизъюнктивным нарушениям. Высокая сейсмическая активность в центральной части моря Лаптевых улучшает проницаемость дизъюнктивных нарушений, что способствует активизации субвертикальной миграции глубинных флюидопотоков и усиливает роль эндогенного фактора деградации ММП и/или ГГ.

В Северной зоне породы ВЧР преимущественно находятся в талом состоянии, однако здесь присутствуют обособленные останцы ММП. Особый интерес вызывает крупная талая зона на Северо-Западном участке работ, подходящая близко к побережью Таймыра. Расчетная доля талых пород составила около 21,6%. Доля талых пород в море Лаптевых значительно меньше, чем в западной части Восточно-Сибирского моря, в которой по предварительным данным она составляет около 62,2% [26; 27].

Сравнение полученных результатов с данными моделирования [7; 9; 13—15] показало наличие существенных различий, особенно сильных в западной и восточной частях моря Лаптевых. С учетом доказанной бурением высокой надежности прогноза физического состояния пород ВЧР по сейсмическим

записям преломленных волн при будущих моделированиях состояния субаквальных ММП и расчетах объемов возможной эмиссии метана в атмосферу (например, [48]) рекомендуется учитывать выполненное нами районирование существования мерзлых и талых пород в море Лаптевых, а также ранее полученные результаты для западной части Восточно-Сибирского моря [26; 27].

## Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9).

## Литература/References

1. Saunio M., Stavert A. R., Poulter B. et al. The Global Methane Budget 2000—2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, vol. 12, pp. 1561—1623. DOI: 10.5194/essd-12-1561-2020.
2. Sayedi S. S., Abbott B. W., Thornton B. F., Frederick J. M. et al. Subsea permafrost carbon stocks and climate change sensitivity estimated by expert assessment. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, 124075. Available at: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abcc29>.
3. Lan X., Thoning K. W., Dlugokencky E. J. Trends in globally-averaged CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and SF<sub>6</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2023-09. Available at: <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
4. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Сравнительный анализ наземных, морских и спутниковых измерений метана в нижней атмосфере российской части Арктики в условиях изменения климата // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 2. — С. 1—14. Anisimov O. A., Kokorev V. A. Comparative Analysis of the Land, Marine and Satellite Observations of Methane in the Lower Atmosphere in the Russian Arctic under the Conditions of the Changing Climate. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, no. 2, pp. 1—14. (In Russian).
5. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Шахова Н. Е. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335. Sergienko V. I., Lobkovskiy L. I., Shakhova N. E. et al. Degradation of underwater permafrost and degradation of hydrates of the Eastern Arctic Shelf seas as a possible cause of a “methane catastrophe”: some results of complex research in 2011. *Dokl. Akad. nauk*, 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian).
6. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G., Nicolovsky D., Samarkin V., Joye S., Charkin A., Dudarev O., Meluzov A., and Gustafsson O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further as-

- assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Philos. T. R. Soc. S.-A*, 2015, vol. 373, p. 2052. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>.
7. Matveeva T. V., Kaminsky V. D., Semenova A. A., Shchur N. A. Factors Affecting the Formation and Evolution of Permafrost and Stability Zone of Gas Hydrates: Case Study of the Laptev Sea. *Geosciences*, 2020, vol. 10, 504, 21 p. DOI: 10.3390/geosciences10120504.
8. Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo-Marine Letters*, 2020, vol. 40, pp. 541—557.
9. Brown J., Ferrians O. J. J., Heginbottom J. A., Melnikov E. S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Washington, D. C., U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, 2001. Available at: <https://doi.org/10.3133/cp45>.
10. Nicolsky D. J., Romanovsky V. E., Romanovskii N. N., Kholodov A. L., Shakhova N. E., Semiletov I. P. Modeling sub-sea permafrost in the East Siberian Arctic Shelf: The Laptev Sea region. *J. of Geophysical Research*, 2012, vol. 117, F03028. Available at: <https://doi.org/10.1029/2012JF002358>.
11. Romanovskii N. N., Hubberten H. W. Permafrost and gas hydrate stability zone on the Laptev Sea shelf (main results of ten-year Russian-German investigation). *Cryosphere of the Earth*, 2006, vol. 10 (3), pp. 61—68.
12. Romanovskii N. N., Hubberten H.-W., Gavrilov A. V., Tumskoy V. E., Kholodov A. L. Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands. *Quat. Sci. Rev.*, 2004, 23, pp. 1359—1369. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.12.014>.
13. Romanovskii N. N., Tumskoi V. E. Retrospective approach to the estimation of the contemporary extension and structure of the shelf cryolithozone in East Arctic. *The Cryosphere of the Earth*, 2011, vol. 15 (1), pp. 3—14.
14. Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modelled using 1d transient heat flux (SuPerMAP). *J. Geophys Res Oceans*, 2019, vol. 124 (6), pp. 3490—3507. Available at: <https://doi.org/10.1029/2018JC014675>.
15. 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 Process*, John Wiley & Sons Ltd., 2020, vol. 31, pp. 442—453. Available at: <https://doi.org/10.1002/ppp.2061>.
16. 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. Frozen ground of the Russian Arctic Shelf (on basis of geophysical studies). Abstract of the dissertation for the degree of doctor of geological and mineralogical sciences. Moscow, MSU, 2023, 45 p. (In Russian).
17. Marine Science Atlas of the Beaufort Sea. *Geology and Geophysics*. Pelletier B. R. (Ed.). Geological Survey of Canada, Miscellaneous. Report 40, 1987, 43 p.
18. 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, pp. 1—6.
19. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55. 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).
20. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*, 2018, 8, 453, 17 p. DOI: 10.3390/geosciences8120453.
21. Богоявленский В. И., Казанин А. Г., Кишанков А. В., Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 178—194. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194. Bogoyavlensky V. I., Kazanin A. G., Kishankov A. V., Kazanin G. A. Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of factors of powerful gas emission in the Laptev Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021, vol. 11, no. 2, pp. 178—194. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194. (In Russian).
22. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г., Казанин Г. А. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Восточно-Сибирское море // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 158—171. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., Kazanin G. A. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the East Siberian Sea. *Arctic: Ecology and Economy*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 157—171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171. (In Russian).
23. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Докл. Акад. наук. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 83—89. — DOI: 10.31857/S2686739721090048. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Permafrost, Gas Hydrates, and Gas Seeps in the Central Part of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, pt. 1, pp. 766—771. DOI: 10.1134/S1028334X2109004X.
24. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Субаквальная криолитозона и сипы газа на шельфе моря Лаптевых // Современные исслед-



- дования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. — Салехард, 2021. — С. 59—62. — DOI: 10.7868/9785604610848013.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G. Subaqueal cryolithozone and gas seeps on the Laptev Sea shelf. Modern studies of cryosphere transformation and questions of geotechnical safety of constructions in the Arctic. Салехард, 2021, pp. 59—62. DOI: 10.7868/9785604610848013. (In Russian).
25. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic). *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 105527, pp. 1—15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105527>.
26. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота и газогидраты на Арктическом шельфе Восточной Сибири // ДАН. Наука о Земле. — 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*, Pleiades Publishing, 2022, vol. 507, pt. 1, pp. 946—951. DOI: 10.1134/S1028334X22600578.
27. 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, 106050, 15 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.106050>.
28. Сенин Б. В., Керимов В. Ю., Богоявленский В. И. и др. Нефтегазоносные провинции морей России и сопредельных акваторий. — Кн. 3: Нефтегазоносные провинции морей Восточной Арктики и Дальнего Востока. — М.: МГРИ, 2022, 339 с.
- Senin B. V., Kerimov V. Y., Bogoyavlensky V. I., Leonchik M. I., Mustaev R. N. Oil and gas bearing provinces of the seas of Russia and adjacent offshore areas. Book 3. Oil and gas bearing provinces of the seas of the Eastern Arctic and Far East. Moscow, MGRI, 2022, 339 p. (In Russian).
29. «Роснефть» подтвердила открытие нового месторождения в Хатангском заливе с запасами более 80 млн тонн нефти. — URL: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/188105/>.
- Rosneft confirmed the discovery of a new field in the Khatanga gulf with reserves of more than 80 million tons of oil. Available at: <https://www.rosneft.ru/press/news/item/188105/> (In Russian).
30. Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. *Geological society, London, petroleum geology conference series*, 2010, vol. 7 (1), pp. 591—619.
31. Кириллова-Покровская Т. А. Актуализированная модель строения моря Лаптевых и основные ловушки УВ структурного класса // Инновационный вектор развития ОАО «МАГЭ»: Сб. статей ОАО «МАГЭ». — СПб., 2017. — С. 228—251.
- Kirillova-Pokrovskaya T. A. Actualized model of the Laptev Sea structure and main HC traps of structural class. *Innovative Vector of Development of JSC "MAGE"*. Compilation of papers, St. Petersburg, 2017, pp. 228—251. (In Russian).
32. Аветисов Г. П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. — Вып. 3. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. — С. 104—114.
- Avetisov G. P. Once again about earthquakes of the Laptev Sea. *Geological and geophysical characteristics of the Arctic region lithosphere*. Iss. 3. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2002, pp. 104—114. (In Russian).
33. Крылов А. А., Иващенко А. И., Ковачев С. А. и др. Сейсмотектоника и сейсмичность Лаптевоморского региона: состояние вопроса и первый опыт годичной постановки донных сейсмостанций на шельфе // Вулканология и сейсмология. — 2020. — № 6. — С. 33—49. — DOI: 10.31857/S0203030620060140.
- Krylov A. A., Ivashchenko A. I., Kovachev S. A. et al. The Seismotectonics and Seismicity of the Laptev Sea Region: The Current Situation and a First Experience in a Year-Long Installation of Ocean Bottom Seismometers on the Shelf. *J. of Volcanology and Seismology*, 2020, vol. 14, no. 6, pp. 379—393. DOI: 10.31857/S0203030620060140.
34. Найдина О. Д. Изменения палеосреды восточного шельфа моря Лаптевых в позднеледниковье // Стратиграфия. Геолог. корреляция. — 2009. — Т. 17, № 5. — С. 95—108.
- Naidina O. D. Changes of paleo environment of the eastern shelf of the Laptev Sea in late ice age. *Stratigraphy. Geological correlation*, 2009, vol. 17, no. 5, pp. 95—108.
35. Крайнева М. В., Малахова В. В., Голубева Е. Н. Численное моделирование формирования аномалий температуры в море Лаптевых, обусловленных стоком реки Лена // Оптика атмосферы и океана. — 2015. — Т. 28, № 6. — С. 534—539. — DOI: 10.15372/A0020150606.
- Kraïneva M. V., Malakhova V. V., Golubeva E. N. Numerical modeling of formation of temperature anomalies in the Laptev Sea, caused by flow of the Lena River. *Optics of atmosphere*, 2015, vol. 28, no. 6, pp. 534—539. DOI: 10.15372/A0020150606. (In Russian).
36. Большианов Д. Ю., Макаров А. С., Шнайдер В., Штоф Г. Происхождение и развитие дельты реки Лены. — СПб.: ААНИИ, 2013. — 268 с.
- Bolshiyonov D. Yu., Makarov A. S., Shnaider V., Shtof G. Origin and development of the Lena River delta. St. Petersburg, AARI, 2013, 268 p. (In Russian).
37. Максимов Г. Т., Григорьев М. Н., Большианов Д. Ю. Формирование и распространение многолетней мерзлоты и таликов под руслами протоков в дельте р. Лена // Природ. ресурсы Арктики и Субарктики. — 2022. — Т. 27 (3). — С. 370—380.

- Maksimov G. T., Grigoriev M. N., Bolshiyarov D. Yu. Formation and distribution of permafrost and taliks under channels of the Lena River Delta. *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2022, vol. 27 (3), pp. 370—380. Available at: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380>. (In Russian).
38. Анисимова Н. П., Павлова Н. А., Стамбовская Я. В. Химический состав подземных вод таликов долины среднего течения реки Лены // *Наука и образование*. — 2005. — № 4 (40). — С. 92—96.
- Anisimova N. P., Pavlova N. A., Stambovskaya Ya. V. Chemical composition of ground waters of the taliks of the Lena River middle flow valley. *Science and education*, 2005, no. 4 (40), pp. 92—96. (In Russian).
39. Franke D., Hinz K., Oncken O. The Laptev Sea Rift. *Mar. Petrol. Geol.*, 2001, vol. 18 (10), pp. 1083—1127. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(01)00041-1).
40. Cramer B., Franke D. Indications for an active petroleum system in the Laptev Sea, NE Siberia. *J. Petroleum Geology*, 2005, vol. 28 (4), pp. 369—384.
41. Overduin P. P., Wetterich S., Günther F., Grigoriev M. N., Grosse G., Schirmermeister L., Hubberten H.-W., Makarov A. Coastal dynamics and submarine permafrost in shallow water of the central Laptev Sea, East Siberia. *The Cryosphere*, 2016, vol. 10, pp. 1449—1462. DOI: 10.5194/tc-10-1449-2016.
42. Koshurnikov A. V., Tumskoy V. E., Skosar V. V., Efimov Ya. O., Kornishin K. A., Bekker A. T., Piskunov Yu. G., Tsimbelman N. Ya., Kosmach D. A. Submarine permafrost in the Laptev Sea. *Intern. J. of Offshore and Polar Engineering*, 2020, vol. 30, no. 1, pp. 86—93. Available at: <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc783>.
43. Петров О. В., Никишин А. М., Петров Е. И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // *ДАН*. — 2023. — Т. 512 (2). — С. 100—110. — DOI: 10.31857/S268673972360100X.
- Petrov O. V., Nikishin A. M., Petrov E. I., Tatarinov V. Y., Kashubin S. N. et al. First results of stratigraphic drilling in the East Siberian Sea focused on the geological studies of the suture zone of the continental shelf's marginal structures and deep-water areas of the Arctic Ocean. *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 512 (2), pp. 100—110. DOI: 10.31857/S268673972360100X. (In Russian).
44. Яковлев Д. В., Яковлев А. Г., Валясина О. А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным региональных электроразведочных работ // *Криосфера Земли*. — 2018. — Т. 22, № 5. — С. 77—95. — DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(77-95).
- Yakovlev D. V., Yakovleva A. G., Valyasina O. A. Studies of the cryolithozone of the northern margin of the Siberian Platform based on data of regional electric survey. *Earth Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 77—95. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(77-95). (In Russian).
45. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., Kosmach D., Brüchert V., Shakhova N. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.*, 2021, vol. 118 (10).
46. Григорьев М. Н. Исследования деградации многолетнемерзлых пород морей Восточной Сибири // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2017. — № 1 (111). — С. 89—96. — URL: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-1-89-96>.
- Grigoryev M. N. Research of degradation of frozen ground of the East Siberian seas. *Arctic and Antarctic Research*, 2017, no. 1 (111), pp. 89—96. Available at: <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-1-89-96>. (In Russian).
47. 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 and Petroleum Geology*, 2023, vol. 157, 106467, 11 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106467>.
48. Miesner F., Overduin P. P., Grosse G. et al. Subsea permafrost organic carbon stocks are large and of dominantly low reactivity. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 9425, 12 p. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36471-z>.

### 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](mailto:geo.ecology17@gmail.com).

**Кишанков Алексей Владимирович**, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: [alexey137k@yandex.ru](mailto: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](mailto:a.kazanin@mage.ru).



## DISTRIBUTION OF SUBSEA PERMAFROST (FROZEN GROUND) IN THE LAPTEV SEA BASED ON SEISMIC REFRACTION DATA

**Bogoyavlensky, V. I.<sup>1</sup>, Kishankov, A. V.<sup>1</sup>, Kazanin, A. G.<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

### For citing

*Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G.* Distribution of subsea permafrost (frozen ground) in the Laptev Sea based on seismic refraction data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 501—515. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515. (In Russian).

The article was received on August 28, 2023

### Abstract

For the first time, for an area of 454 thousand km<sup>2</sup> of the Laptev Sea, processing and comprehensive analysis of a large volume of records of the first arrivals of refracted waves of common shot gathers was carried out along 113 CDP seismic lines of JSC MAGE with a total length of about 20.7 thousand km. Fundamentally new information was obtained on the state of the subsea cryolithozone, and the boundary between the predominant distribution of frozen (Southern zone) and thawed (Northern zone) ground was identified. It was substantiated that a number of identified through taliks in the Southern zone have an endogenous genesis and are associated with large disjunctive displacements. High seismic activity in the central part of the Laptev Sea improves faults permeability, which contributes to the activation of subvertical migration of deep fluid flows and enhances the role of the endogenous factor in the degradation of permafrost (frozen ground) and gas hydrates. A large thawed zone was discovered in the North Western area of JSC MAGE activities, approaching close to the coast of Taimyr. A comparison of the results obtained with the data of the stratigraphic well DL-1, drilled in 2022 by FSBI VSEGEI and JSC Rosgeologia near the eastern border of the Laptev Sea, showed their complete correspondence, clearly indicating completed degradation of subsea permafrost in a significant part of the seas of Eastern Siberia.

**Keywords:** *Laptev Sea, seismic, refraction waves, upper part of the section, permafrost (frozen ground), taliks, gas seeps, gas hydrates.*

### Funding

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of the oil and gas resources development in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate” (No. 122022800264-9).

---

### Information about the authors

**Bogoyavlensky, Vasily Igorevich**, Doctor of Technical 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**, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

**Kazanin, Aleksey Gennad'evich**, Doctor of Economic Science, PhD of Technical Science, Director General, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya str., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

© Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., 2023