

КРИОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МОРЯХ И ОКЕАНАХ

УДК 551.341: 551.35
DOI: 10.15372/KZ20230501
EDN: RGDRCU

МЕРЗЛЫЕ И ОХЛАЖДЕННЫЕ ГРУНТЫ КРИОЛИТОЗОНЫ
БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

С.И. Рокос^{1,*}, Д.А. Костин², А.В. Тулапин¹, С.Н. Куликов¹, А.Г. Длугач¹

¹ Арктические морские инженерно-геологические экспедиции (АМИГЭ),
183025, Мурманск, ул. Карла Маркса, 19, Россия

² Мурманский государственный технический университет,
183010, Мурманск, ул. Спортивная, 13, Россия

*Автор для контакта, RokosSI@rusgeology.ru

Целью работы является установление генезиса и условий формирования различных типов грунтов, входящих в состав криолитозоны Байдарацкой губы. На основе материалов инженерно-геологического бурения, а также данных термометрии керна и термостатического зондирования выделены многолетне- и сезонномерзлые грунты, а также многолетне- и сезонноохлажденные грунты. Грунты в многолетнемерзлом состоянии сформированы при эпигенетическом промерзании в течение сартанской регрессии. В составе сезонномерзлых отложений, залегающих у поверхности дна, выделено два типа. Первый из них образуется на участках прибрежных мелководий, где припайный лед соприкасается с дном. Второй тип формируется в мористой части акватории в течение холодного сезона, когда температура придонных вод понижается до значений, меньших температуры начала замерзания грунта. Охлажденные грунты также подразделены на многолетние и сезонные. Многолетнеохлажденные грунты развиты ниже глубины положения нулевой изотермы, прослеженной в наиболее теплый период года. Грунты, развитые выше нулевой изотермы, имеют в теплые сезоны года положительные температуры. В зимний сезон под воздействием отрицательных температур придонных морских вод они также переходят в охлажденное или сезонномерзлое состояние.

Ключевые слова: Карское море, Байдарацкая губа, многолетнемерзлые породы, мерзлые грунты, охлажденные грунты, сезонномерзлые грунты, субаквальная криолитозона, температура грунта, температура начала таяния, термостатическое зондирование, четвертичные отложения.

Ссылка для цитирования: Рокос С.И., Костин Д.А., Тулапин А.В., Куликов С.Н., Длугач А.Г. Мерзлые и охлажденные грунты криолитозоны Байдарацкой губы // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 5, с. 3–15. DOI: 10.15372/KZ20230501. EDN: RGDRCU.

FROZEN AND CRYOTIC GROUND IN THE BAYDARA BAY AREA

S.I. Rokos^{1,*}, D.A. Kostin², A.V. Tulapin¹, S.N. Kulikov¹, A.G. Dlugach¹

¹ Arctic Marine Engineering-Geological Expeditions (AMIGE),
Karla Marksa St. 19, Murmansk, 183025 Russia

² Murmansk State Technical University,
Sportivnaya St. 13, Murmansk, 183010 Russia

*Corresponding author, RokosSI@rusgeology.ru

The purpose of this study is to establish the genesis and conditions of formation of different types of sediments in the permafrost area of Baydara Bay. Perennially and seasonally frozen and perennially and seasonally cryotic sediments have been identified on the basis of temperature measurements in core samples obtained during geotechnical drilling and thermal cone penetration tests along the profile crossing the bay. We suppose that permafrost was formed in this area in the course of epigenetic freezing during the Sartan regression. Seasonally frozen ground of the seafloor is subdivided into two types. The first type is characteristic of coastal shallows, where landfast ice contacts the seafloor. The second type is formed in the seaward part of the water area during the cold season, when the temperature of near-bottom seawater drops to values below the freezing point. Perennially cryotic (but unfrozen) ground is formed below the depth of the 0° isotherm traced during the warm season. Seasonally cryotic ground above this isotherm has above-zero temperatures in the warm season. In the winter season, under the impact of subzero temperatures of seafloor water, it is transformed into the cryotic or seasonally frozen state.

Keywords: *the Kara Sea, the Baydara Bay, permafrost, frozen ground, cooled soils, seasonally-frozen soils, subsea permafrost, soil temperature, a melting point temperature, a thermal cone penetration test, Quaternary deposits.*

ВВЕДЕНИЕ

Геокриологическим условиям юго-западной части карского шельфа и прилегающего побережья Ямала посвящены работы [Григорьев, 1987; Геокриологические условия..., 2003; Криосфера..., 2006; Рокос и др., 2009; Дубровин и др., 2015; Шполянская, 2015; Васильев и др., 2016; Баду, 2018]. Криолитозона акватории Байдарацкой губы наиболее подробно рассмотрена в [Дубиков, Иванова, 1996; Природные условия..., 1997]. В указанных работах отмечено, что в области распространения криолитозоны данного региона присутствуют как многолетнемерзлые и талые образования, так и сезонномерзлые и охлажденные грунты. Поскольку данные о температуре грунтов рассматриваемой акватории весьма немногочисленны и разрознены, температурная характеристика шельфовой криолитозоны в этих работах носит не совсем полный и несколько схематичный характер. В то же время для акватории Байдарацкой губы имеется достаточно большой объем температурных измерений в грунтовой толще и материалов бурения, полученных в 1994–2006 гг. Сами эти материалы и результаты их интерпретации ранее не публиковались. В связи с этим целью представленной работы является выделение, локализация и типизация мерзлых и охлажденных грунтов криолитозоны рассматриваемого района по полным данным бурения и термометрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование опирается на материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных предприятием “Арктические морские инженерно-геологические экспедиции” (АМИГЭ) в 1988–2006 гг. для строительства перехода газопровода Ямал–Центр через Байдарацкую губу (по четырем ниткам в коридоре общей протяженностью около 70 км и шириной 500–700 м). В работе использованы данные бурения, статического зондирования с измерениями температуры (термостатическое зондирование), термометрии керна, а также лабораторных определений состава и свойств донных грунтов.

В летне-осенний навигационный сезон в мористой части акватории с глубинами моря более 5–7 м бурение проводилось со специализированных судов “Бавенит” и “Кимберлит”. На прибрежном мелководье скважины бурились в холодный зимне-весенний период с припайного льда.

Всего за указанный период в акваториальной части трассы газопровода было пробурено 639 скважин глубиной от 7–10 до 20–40 м от дна

(рис. 1). Одна скважина в центральной части трассы изысканий (№ 01) была пробурена на глубину 115 м. Отбор керна осуществлялся колонковыми двойными и одинарными, а также гидроударными, вибрационными и вдавливаемыми грунтоносами.

Сведения о скважинах, вскрывших мерзлые грунты мористой части акватории, представлены в таблице.

Идентификация мерзлых образований в керне осуществлялась визуально-тактильным способом по наличию ледяных включений и порового льда-цемента.

Термостатическое зондирование было выполнено в сентябре 1994 г. в 40 точках на двух нитках трассы изысканий. Оценки температуры грунта, полученные данным методом, представляются наиболее близкими к ее истинным значениям. Приповерхностное зондирование на глубину до 11 м от поверхности дна выполнялось донной установкой типа Wheel Drive производства компании Fugro Engineers B.V. методом непрерывного вдавливания зонда. Эти исследования проводились также в скважинах с поинтервальным разбуриванием пропенетрированных интервалов. Усилие вдавливания в обоих случаях составляло до 200 кН. Для измерения температуры применялся зонд F 7.5 Sket/V-a производства компании Fugro Engineers B.V. Точность измерения температуры составила ± 0.05 °С. Глубина зондирования – от 4 до 21 м ниже дна. Методика выполненного термостатического зондирования в целом соответствует [ГОСТ Р 58961-2020, 2020].

Для **термометрии керна** использовались термометры типа Comark C9001 (Comark Instruments) с датчиками в тонком металлическом шупе. Замеры выполнялись в забойной части сразу после подъема грунтоноса на палубу до извлечения из него керна.

Для значений температуры, измеренной в керне, характерна высокая степень изменчивости, обусловленная условиями бурения. Керны подвергаются интенсивному тепловому воздействию при бурении за счет работы породоразрушающего инструмента и при циркуляции промывочной жидкости в призабойной части скважины и вдоль стенок грунтоноса. Применявшаяся в качестве промывочной жидкости забортная морская вода отбиралась из верхних горизонтов водной толщи, где в теплый сезон года она прогревалась до $+5...+10$ °С, что значительно превышало температуру мерзлых и талых грунтов. Кроме того, на степень и интенсивность разогрева керна повлияли различия в способах и режимах бурения, а также изменчивость состава и свойств грунтов.

МЕРЗЛЫЕ И ОХЛАЖДЕННЫЕ ГРУНТЫ КРИОЛИТОЗОНЫ БАЙДАРАЦКОЙ ГУБЫ

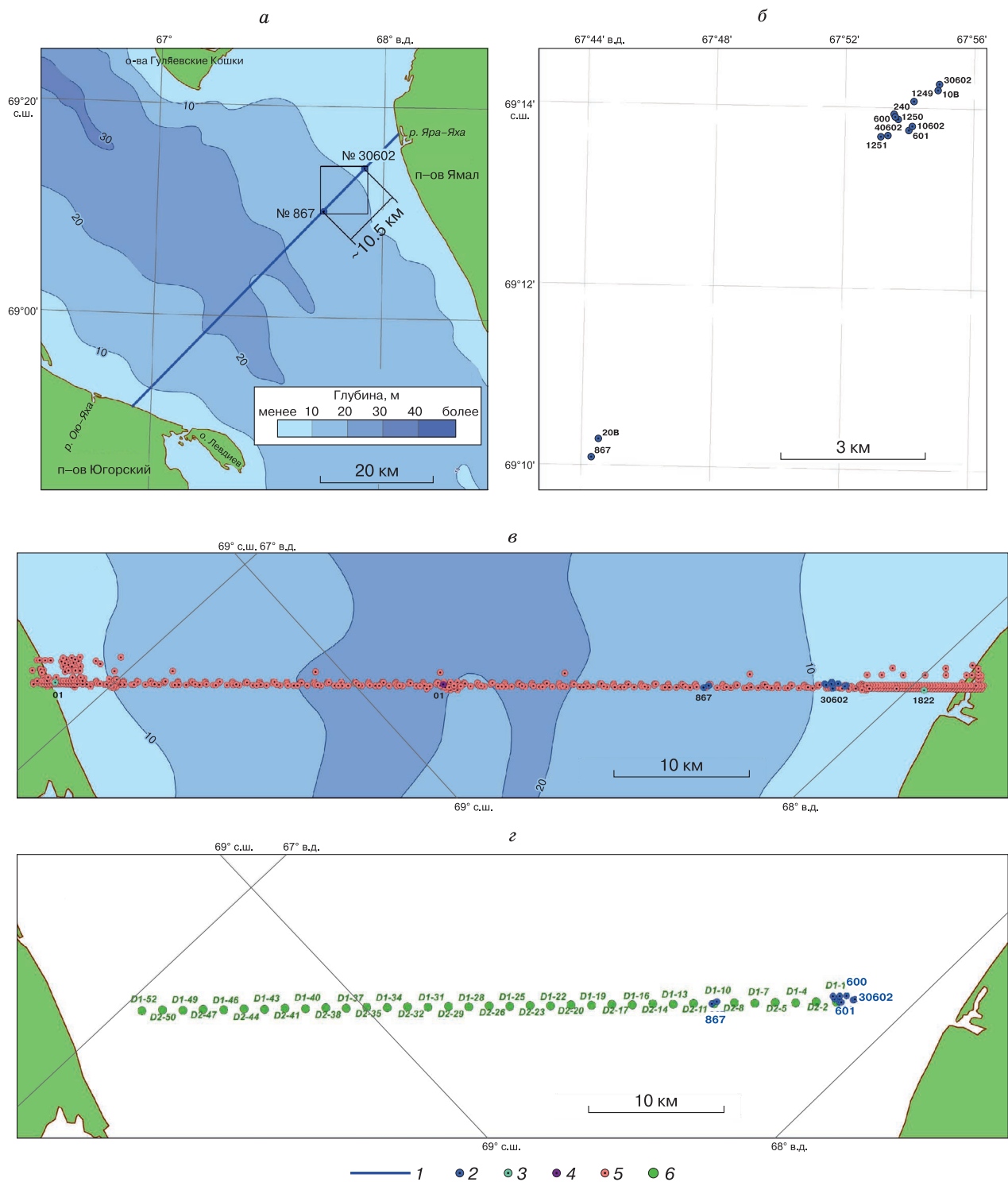


Рис. 1. Местоположение трассы изысканий, инженерно-геологических скважин и точек термостатического зондирования.

a – местоположение трассы и залежи многолетнемерзлых грунтов, расположенной между скважинами № 867 и 30602;
б – местоположение инженерно-геологических скважин, вскрывших локальную залежь многолетнемерзлых грунтов;
в – местоположение инженерно-геологических скважин; *г* – местоположение точек термостатического зондирования;
 1 – трасса трубопровода; 2 – инженерно-геологические скважины, вскрывшие многолетнемерзлые грунты; 3 – инженерно-геологические скважины, вскрывшие сезонномерзлые грунты; 4 – скважина глубиной 115 м от дна; 5 – скважины глубиной более 10 м от дна; 6 – точки термостатического зондирования.

**Координаты и глубина моря в точках заложения скважин,
вскрывших многолетнемерзлые грунты в мористой части акватории**

Номер скважины	Координаты (WGS - 84)		Глубина моря, м	Дата бурения	Глубина бурения от дна, м	Глубина залегания кровли многолетнемерзлых грунтов от дна, м
	северная широта	восточная долгота				
867	69.1674550	67.7404280	17.5	16.09.88	30.0	28.8
600	69.2311615	67.8949207	13.6	15.09.94	33.4	18.0
601	69.2287213	67.9022537	13.4	16.09.94	33.5	15.2
240	69.2316465	67.8944893	12.8	17.09.91	42.0	15.7
10В	69.2361840	67.9168456	12.5	09.09.95	30.0	13.0
20В	69.1708220	67.7440327	16.9	27.08.95	39.0	18.6
10602	69.2302524	67.90225595	13.5	31.07.06	20.0	12.8
30602	69.2380446	67.91582619	12.3	29.07.06	20.0	12.2
40602	69.2286056	67.88918972	13.8	28.07.06	20.0	18.8
1251	69.2283158	67.8858501	12.8	17.04.89	22.5	18.4
1250	69.2315677	67.8945328	13.5	13.04.89	21.5	16.3
1249	69.2349333	67.9027684	13.6	26.04.89	21.0	13.2
112	68.8556010	66.9277430	5.5	12.05.88	11.5	3.5
1822	69.2732580	68.0207630	6.8	28.05.88	19.5	0.0

Примечание. В таблицу не включены скважины, вскрывшие многолетнемерзлые образования, пробуренные в прибрежных частях при глубине моря менее 2.5 м.

При этом очевидно, что техногенные изменения температуры керна относительно истинной температуры грунта могут быть только в сторону повышения. Вместе с тем значения температуры керна в любом случае могут рассматриваться как верхний предел истинных значений температур *in situ*.

Другим пределом, позволяющим верифицировать полученные данные, является температура начала таяния или замерзания мерзлого или талого грунта (T_{bf}) соответственно. Очевидно, что температура мерзлого грунта не может быть выше значений этого показателя, а талого – ниже. Значения T_{bf} были рассчитаны по концентрациям порового раствора в соответствии с Приложением Б, СП 25.13330.2012 [2011].

Засоленность и состав ионного комплекса легкорастворимых солей определялись по ГОСТ 26428-85 [1985] и ГОСТ 26423-85 [1985].

Характеристики и классификация мерзлых и талых грунтов в данной работе приводятся в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [2020].

Геологическое строение верхней части разреза

По материалам инженерно-геологического бурения и сейсмоакустического профилирования в соответствии с [Унифицированная... схема..., 2000] в строении толщ отложений верхней части разреза до глубины 30–50 м снизу вверх авторами выделяются следующие стратиграфогенетические комплексы (рис. 2):

- морские, ледово-морские отложения казанцевского горизонта $m, gmIII^1kz$;
- аллювиальные отложения ермаковского горизонта $aIII^2er$;
- морские, аллювиально-морские отложения каргинского горизонта $m, amIII^3kr$;
- озерно-аллювиальные отложения сартанского горизонта $laIII^4sr$;
- морские осадки голоцена mH .

На югорском побережье также выделяется комплекс голоценовых озерно-болотных отложений (lpH).

Многолетнемерзлые грунты

На прилегающих к акватории Байдарацкой губы побережьях полуостровов Ямал и Югорский мерзлые отложения развиты повсеместно и имеют в основном сплошное распространение. Мощная мерзлая толща (свыше 50 м), развитая на террасе высотой около 5 м на западном югорском побережье в районе примыкания трассы трубопровода, резко прерывается у самого уреза воды (см. рис. 2). В составе этой толщи отмечены пластовые льды и криопэги.

Восточный ямальский берег в районе примыкания трассы трубопровода представлен низкой аккумулятивной лайдой, сложенной голоценовыми осадками. Вероятно, эта лайда сформировалась в позднеголоценовое время и в течение истории своего существования неоднократно затопливалась морем и водами р. Яра-Яха. В связи с этим мощность мерзлой толщ здесь невелика (до 6 м).

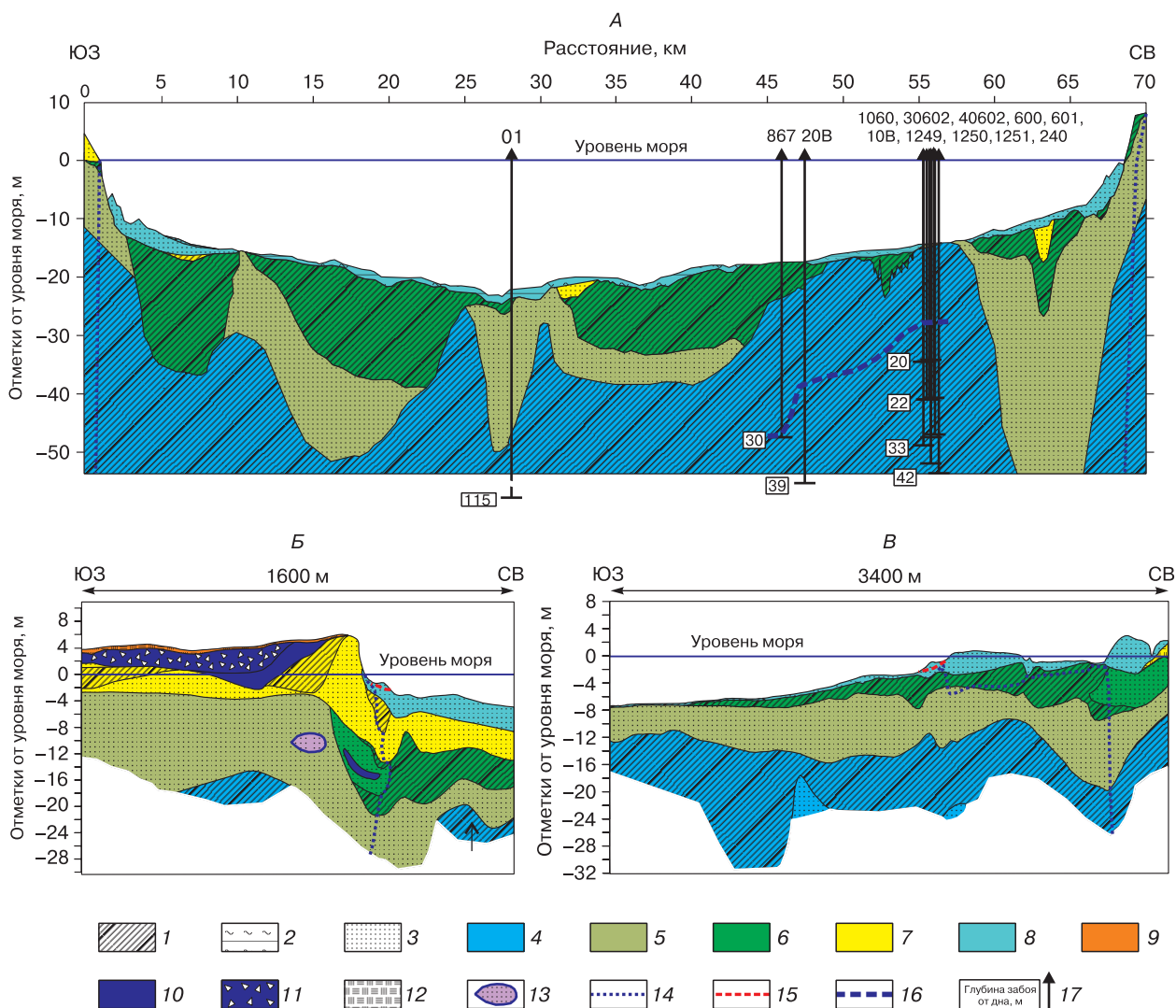


Рис. 2. Инженерно-геологические разрезы через акваторию Байдарацкой губы и береговые примыкания.

А – акватория Байдарацкой губы; Б – западное примыкание; В – восточное примыкание; 1 – суглинки; 2 – глинистые и суглинистые илы; 3 – пески мелкие и пылеватые; 4 – морские, ледово-морские отложения казанцевского горизонта (m, gm III¹kz); 5 – аллювиальные отложения ермаковского горизонта (a III²er); 6 – морские, аллювиально-морские отложения каргинского горизонта (m, am III³kr); 7 – озерно-аллювиальные отложения сартанского горизонта (la III⁴sr); 8 – морские осадки голоцена (mH); 9 – голоценовые озерно-болотные отложения (lpH); 10 – пластовые льды; 11 – сильнольдистые грунты с атакситовой криотекстурой; 12 – торф и сильнооторфованные грунты; 13 – криопэги; 14 – границы материковых мерзлых толщ на разрезе; 15 – подошва сезонномерзлого слоя; 16 – предполагаемая кровля локального многолетнемерзлого массива акватории на разрезе; 17 – инженерно-геологическая скважина и глубина ее забоя в метрах.

Внешняя граница мощной (более 30 м) субэаральной толщи мерзлых образований располагается на расстоянии около 700 м от берега.

В акватории локальная залежь мерзлых грунтов протяженностью около 10.5 км была установлена в восточной части участка трассы изысканий между скважинами № 867 и 30602 при глубине моря от 9.0 до 17.5 м (см. рис. 1, а, б; 2).

Кровля мерзлых грунтов, вскрытых скважинами, залегает на глубине от 12.2 до 28.8 м ниже дна (см. таблицу, рис. 2), их мощность изменяется от менее 1 до 15 м и более. От мерзлой толщи ближайшего ямальского побережья данные образования обособлены обширным таликом (понятие “талики” здесь и далее приводится по: [Романовский, 1972]), протяженность которого по линии трассы

изысканий составляет 8.6 км. Сведения о скважинах, вскрывших мерзлые грунты, представлены в таблице.

Описываемые образования представлены суглинками и глинами казанцевского горизонта. В их составе выделяются две разновидности. Первая из них представлена пластично-мерзлыми слабодыстыми/льдистыми суглинками, реже глинами с наклонными ледяными шпирями (вероятно, фрагменты сетчатой криотекстуры). Засоленность грунтов – от слабой до средней, тип засоления морской хлоридный и сульфатно-хлоридный.

Вторая разновидность представлена сильнольдистыми суглинками и ледогрунтом. В отдельных интервалах данные образования замещаются чистым прозрачным стекловатым пресным льдом (пластовые льды?). Минерализация льда по единичному определению 0.36 г/л. Суммарные мощности сильнольдистых, ледогрунтовых образований и льда в разрезах скважин достигают 10 м. Криотекстуры в сильнольдистых суглинках в основном атакситовые.

Кроме того, многолетнемерзлые отложения были вскрыты также скважинами, пробуренными в холодные зимне-весенние сезоны с припайного льда. Эти образования, представленные песками пылеватого и мелкого состава, развиты вблизи поверхности дна. По условиям залегания и распространения выделяется два типа рассматриваемых грунтов.

Приповерхностные мерзлые образования первого типа установлены на отдельных участках прибрежных зон при глубине моря до 2.5 м и удалении от уреза воды не более 200 м. Здесь толщи описываемых грунтов прослеживаются в виде тонких “kozyрьков”, сопряженных своим латеральным основанием с береговыми мерзлыми массивами и выклинивающимися в мористом направлении (см. рис. 2). Мощность данных образований не превышает 2.5 м, кровля залегает на глубине 1–2 м от поверхности дна, а в некоторых случаях совпадает с ней.

Другой тип приповерхностных мерзлых грунтов развит на относительно мористых участках акватории. Эти образования были вскрыты скважинами № 112 (пробурена 12.05.1988 г.) в интервале 3.5–3.8 м от дна и № 1822 (21.05.1988 г.) в интервале от поверхности дна до глубины 1 м (см. рис. 1, в). Представлены данные отложения песками мелкого и пылеватого состава. Глубина моря в районе устья скважины № 112 составляет 5.5 м, удаление от югорского берега 425 м, в районе скважины № 1822 глубина моря 6.8 м, удаление от ямальского берега составляет 2200 м. В кернах соседних скважин подобные мерзлые образования не обнаружены, что позволяет предположить, что они имеют прерывистый характер распространения и залегают в виде тонких линз.

Результаты температурных измерений в мерзлых грунтах

Полученные в результате измерений различными методами значения температуры грунтов акватории Байдарацкой губы изменяются в диапазоне от +5.0...+10.0 до –1.6...–1.0 °С.

Вертикальное распределение значений температуры, измеренной в кернах, показывает наличие отрицательного градиента в разрезах талых грунтов в интервале от поверхности дна до кровли мерзлых образований (рис. 3). В этом интервале температура грунта понижается от положительных значений у поверхности дна до отрицательных в подошве талых интервалов.

В интервалах мерзлых пород также отмечается снижение значений измеренной в керне температуры от кровли к отметкам, расположенным в средних и нижних частях разрезов. В кровле температура мерзлых грунтов не выше –1.1...–0.9 °С, внизу она не более –1.6...–1.4 °С. В разрезе скважины № 10В в нижнем интервале пластично-мерзлого суглинка, залегающего под сильнольдистыми образованиями и ледогрунтом, температура приобретает минимальные значения (–1.6 °С) и не изменяется с глубиной (по трем измерениям).

Термостатическим зондированием измерения были проведены лишь в верхних интервалах мерзлой толщи, сложенных пластично-мерзлыми суглинками. В сильнольдистых образованиях и ледогрунтах измерения данным методом провести не удалось, так как усилие вдавливания оказалось недостаточным для внедрения измерительного конуса.

Температура разреза, вскрытого скважиной № 600 и содержащего в своем составе как мерзлые, так и талые грунты, была измерена до глубины 21 м от дна в точке, заложенной вблизи устья. При переходе от талых (охлажденных) образований к мерзлым на глубине 18 м от дна наблюдается достаточно резкое скачкообразное изменение температуры от –0.3 до –0.9 °С (см. рис. 3). В самом верхнем интервале, сложенном пластично-мерзлыми суглинками, эти значения варьируют от –1.0 до –0.9 °С (всего три значения). Определить наличие градиента по этим данным не представляется возможным в связи с малой глубиной внедрения измерительного конуса и недостаточным количеством замеров.

В точке зондирования вблизи устья скважины № 601 внедрить измерительный конус в мерзлую толщу на достаточную глубину не удалось, так как он, по-видимому, не смог продавить крупный ледяной прослой, залегающий в самой кровле. В связи с этим здесь оценки температуры мерзлых грунтов не были получены.

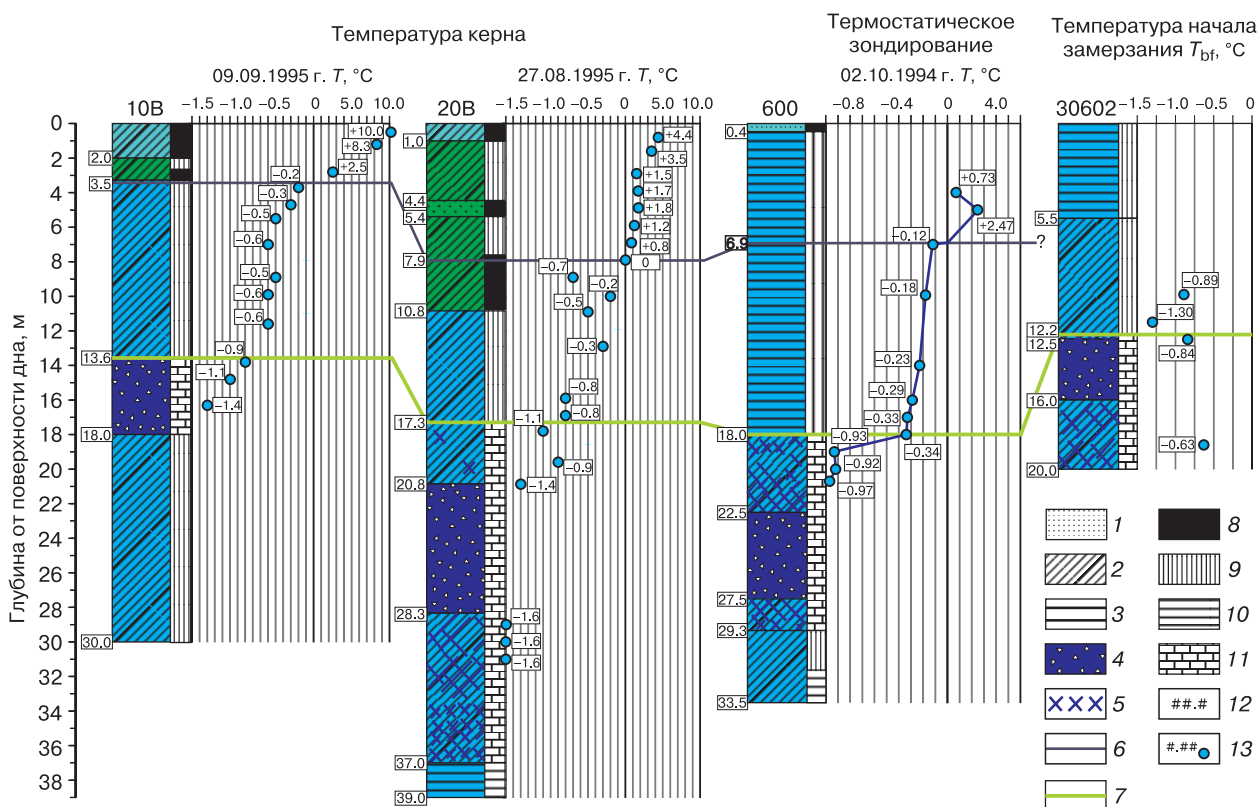


Рис. 3. Вертикальные профили температур по данным измерений в кернах скважин № 10В и 20В, результаты термостатического зондирования скважины № 600 и профиль температур начала замерзания по разрезу скважины № 30602.

1 – пески; 2 – суглинки; 3 – глины; 4 – сильнольдистые глины и суглинки с атакситовой криотекстурой, ледогрунт и пластовые льды; 5 – ледяные шпирь; 6 – кровля охлажденных грунтов; 7 – кровля многолетнемерзлых грунтов; 8–11 – состояние грунтов (8 – текучее для глин и суглинков, водонасыщенное для песков, 9 – тугопластичное, 10 – твердое/полутвердое, 11 – мерзлое); 12 – (слева от колонок скважин) глубины от поверхности дна, м; 13 – точка измерения температуры и ее значение в градусах Цельсия. Стратиграфию см. на рис. 2, местоположение скважин см. на рис. 1, б.

В целом все, полученные как термостатическим зондированием, так и термометрией керна, оценки температуры мерзлых грунтов были ниже температуры начала таяния в коррелятных интервалах (относительно кровли мерзлой толщи) соседней скважины № 30602, что свидетельствует в пользу их достоверности.

Выделение и локализация охлажденных грунтов

По данным приповерхностного термостатического зондирования выполнено выделение охлажденных грунтов до глубин 7–11 м от дна в 38 точках. Эти точки равномерно распределены по линии участка трассы изысканий протяженностью около 51 км (см. рис. 1, в; 4). Глубина моря в пределах участка изменяется от 10.0 до 22.5 м.

Корреляция температурных графиков приповерхностного термостатического зондирования показывает четко выраженный отрицательный градиент в интервале от поверхности дна до от-

меток, на которых значения температуры близки к нулевым. Глубже указанных отметок эти значения колеблются в относительно узком диапазоне от $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ до околонулевых величин. Четко выраженного градиента изменения температуры здесь не наблюдается. Засоленные грунты с отрицательной температурой, не содержащие в своем составе льда и залегающие ниже нулевой изотермы, в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [2020] рассматриваются как охлажденные.

Глубина положения изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующая кровле толщи охлажденных грунтов, за период наблюдений (с 20.09.1994 по 30.09.1994 г.) составила от 3.0 до 8.4 м. Минимальные отметки наблюдаются в восточной и центральной частях трассы, максимальные – у западного побережья.

По засоленности (D_{sal}) в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [2020] охлажденные грунты в приповерхностном интервале относятся к слабозасоленным (рис. 5). При этом концентрация порового

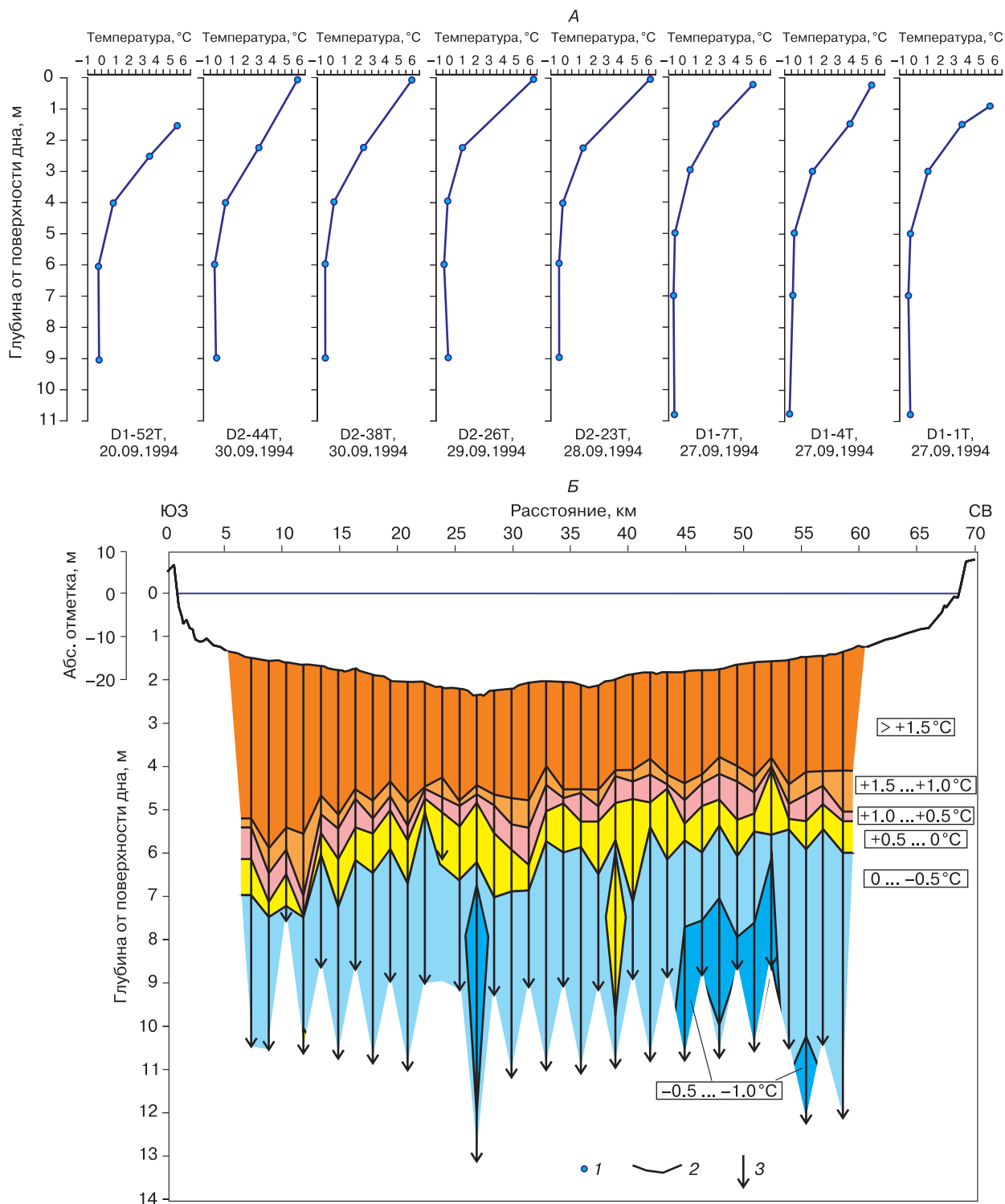


Рис. 4. Корреляция графиков приповерхностного термостатического зондирования (А) и геотермический разрез через акваторию Байдаратской губы (Б).

Б: Положение дневной поверхности на суше и поверхности дна в акватории представлено относительно абсолютной системы высот (глубин); распределение значений температуры в грунтовой толще приведено относительно глубины от поверхности дна. 1 – точки измерения температуры на графиках; 2 – дневная поверхность на суше и поверхность дна в акватории; 3 – точки термостатического зондирования на разрезе. Местоположение точек термостатического зондирования см. на рис. 1, з.

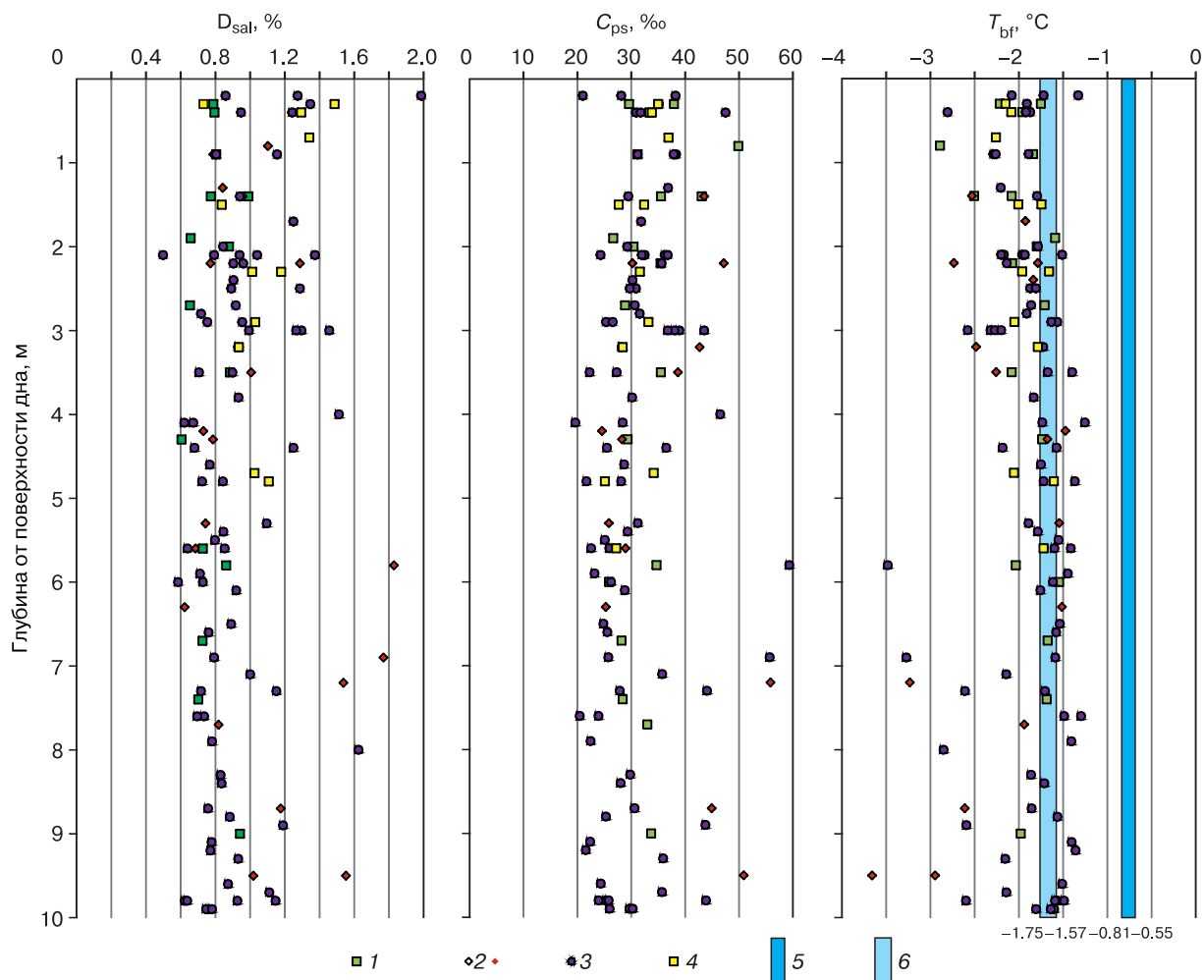


Рис. 5. Сводные графики вертикальной изменчивости значений степени засоленности (D_{sal}), концентрации порового раствора (C_{ps}) и температуры начала замерзания (T_{bf}) в интервале от поверхности дна до глубины 10 м.

1 – песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – диапазон среднегодовых значений температуры придонной воды; 6 – диапазон минимальных значений температуры придонной воды.

раствора (C_{ps}) в данных грунтах изменяется в основном от 20 до 40 ‰. В отдельных случаях она может достигать 50 ‰ и более.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многолетнемерзлые грунты относительно глубоководной части акватории (глубины моря более 9 м), развитые на участке трассы изысканий между скважинами № 867 и 30602 (см. рис. 1, а, в; 2), являются, по-видимому, реликтовыми образованиями. Подобные образования достаточно широко развиты на мелководном арктическом шельфе. Они были сформированы в субэральных условиях в течение последней позднеоплейстоценовой регрессии, когда уровень моря понизился до нижних отметок, близких к 100 м толщи

[Osterkamp, 2001; Angelopoulos et al., 2020]. На шельфе Карского моря данная регрессия произошла в сартанское время. В ходе этого события, в условиях холодного арктического климата, произошло глубокое эпигенетическое промерзание осадочной толщи [Рокос и др., 2009]. Здесь важно отметить, что при глубинах моря, существенно превышающих 100 м, мерзлые грунты, содержащие в своем составе лед, до сих пор не установлены.

Последовавшая за этим трансгрессия современного арктического бассейна привела к существенной деградации мерзлых образований. Они испытали абразию и весьма значительное таяние сверху под действием тепла от придонного слоя воды с температурой, превышающей температуру

фазового перехода. При этом протаиванию в первую очередь подвергались наименее льдистые и наиболее засоленные разновидности. Слабозасоленные и незасоленные сильнольдистые образования, ледогрунты и пластовые льды оттаивали последними.

В результате к сегодняшнему дню мерзлые грунты, содержащие в своем составе лед, сохранились в виде локальных массивов (криореликтов), разделенных обширными таликами (островной тип распространения). В настоящее время происходит медленное таяние этих криореликтов в подошве под действием глубинного теплового потока. Их температура в основном отрицательная и близка к температуре фазового перехода.

К числу таких криореликтов авторы относят и залежь мерзлых грунтов в восточной глубоководной части Байдарацкой губы, вскрытую бурением на участке трассы изысканий между скважинами № 876 и 30602. По характеру своего залегания и условиям распространения, а также по засоленности, состоянию и температуре эти грунты аналогичны реликтовым многолетнемерзлым образованиям других районов арктического шельфа, включая Карское и Печорское моря [Рокос и др., 2009].

Следует отметить, что существуют и альтернативные гипотезы формирования субаквальных многолетнемерзлых образований. Согласно этим гипотезам допускается, что многолетнемерзлые отложения могут образовываться под воздействием отрицательной температуры придонных вод и(или) при охлаждении, связанном с адиабатическим расширением газа, содержащегося в приповерхностных осадках [Шполянская, 2015; Баду, 2018]. По состоянию на сегодняшний день эти предположения не нашли четкого и однозначного подтверждения в имеющемся фактическом материале.

Температура пластично-мерзлых грунтовых разновидностей описываемого криореликта составляет $-0.9...-1.6$ °С. Такие значения в целом характерны для слабо- и средnezасоленных слабольдистых/льдистых пластично-мерзлых глинистых образований. Они близки по своей величине к температуре начала таяния (T_{bf}), разница обычно не превышает 0.5 °С. В интервалах разреза, сложенных ледогрунтом (включая пластовые льды) и сильнольдистыми грунтовыми разновидностями, разница между температурами грунта и начала таяния существенно выше, чем в пластично-мерзлых слабольдистых/льдистых глинистых отложениях. Это обусловлено тем, что в составе указанных разновидностей преобладает пресный лед с температурой таяния около 0 °С.

Мерзлые отложения, развитые у поверхности дна (на глубине до 5 м), рассматриваются авторами как сезонные образования. Это подтверждает-

ся тем, что в кернах скважин, пробуренных в теплый период в районах, где были вскрыты образования в холодные месяцы года, признаков наличия льда не обнаружено.

При этом авторы разделяют сезонномерзлые образования на два генетических типа, также отличающихся друг от друга по условиям своего распространения и залегания. К первому типу отнесены прибрежные сезонномерзлые грунты, залегающие в виде “kozyрьков”, выклинивающихся в мористом направлении на незначительном удалении от береговой линии. Второй тип представлен тонкими приповерхностными мерзлыми линзами, установленными в более мористых и глубоководных частях акватории.

Предполагается, что образования первого типа формируются на прибрежных участках с глубинами моря менее 2.5 м, где припайный лед соприкасается с морским дном (см. рис. 1, в; 2). Благодаря своей высокой теплопроводности, которая значительно выше, чем у морской воды, лед играет роль “теплового моста” между холодным атмосферным воздухом и поверхностью дна. Это способствует интенсивному охлаждению донных грунтов и формированию сезонномерзлого слоя. Вероятно, после отрыва и(или) разрушения припая этот слой быстро протаивает.

Аналогичный процесс формирования субаквальных сезонномерзлых образований на сублитеральной части площади Харасавэйского месторождения и в других прибрежных районах п-ова Ямал был ранее описан в работах [Григорьев, 1987; Геокриологические условия..., 2003; Криосфера..., 2006; Шполянская, 2015].

Второй тип приповерхностных мерзлых грунтов, вскрытых скважинами № 112 и 1822 (см. рис. 1, в), развитый на относительно более мористых и глубоководных участках, мы связываем с сезонным промерзанием в результате теплообмена верхних слоев осадочной толщи и горизонта придонных вод в холодный зимне-весенний период года.

Согласно данным [Природные условия..., 1997], среднегодовая температура придонных вод Байдарацкой губы у югорского и ямальского берегов при глубине моря от 3 до 13 м имеет значения -0.5 и -0.8 °С соответственно. В приосевой глубоководной части губы при глубине моря более 13 м она достигает -0.8 °С. В наиболее холодный месяц (май) эта температура понижается до -1.6 °С у ямальского побережья, а в глубоководной части до -1.8 °С. В наиболее теплый сезон года (август–сентябрь) придонная температура морской воды на всех указанных участках переходит в положительную область.

Сопоставление этих значений с температурой начала замерзания грунтов, развитых на участке трассы с глубинами моря более 5 м, показывает,

что приповерхностные интервалы осадочной толщи (до глубины около 10 м от дна) могут переходить в мерзлое состояние в течение наиболее холодных месяцев года (см. рис. 5). При этом глубина возможного промерзания остается неизвестной.

Сезонномерзлые грунты этого типа вскрыты всего двумя скважинами, на участках вблизи побережий. Однако авторы предполагают, что рассматриваемые образования в пределах акватории развиты гораздо шире. Вероятно, при увеличении количества скважин и расширении буровых работ на всю акваторию губы в холодный период года число случаев обнаружения сезонномерзлых образований данного типа значительно увеличится.

Кроме того, следует отметить, что среднегодовые температуры придонного горизонта существенно выше температуры начала замерзания грунтов. Очевидно, это не позволяет сформироваться здесь многолетнемерзлым образованиям.

Охлажденные грунты, залегающие в разрезе глубже изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4), рассматриваются авторами как протаявшие многолетнемерзлые образования. После вытаивания льда из этих образований температура верхней части грунтовой толщи повысилась, но осталась в области отрицательных значений. Причем эти значения превышают температуру начала замерзания в силу относительно высокой засоленности рассматриваемых образований.

В результате теплообмена с придонным горизонтом воды и приповерхностным слоем грунта в теплый сезон года, когда вода у дна прогревается, нулевая изотерма опускается по разрезу. В это время придонные грунты, залегающие выше нулевой изотермы, испытывают растепление и приобретают положительную температуру. В холодный сезон придонный горизонт воды подвергается обратному охлаждению, которое передается толще донных грунтов. Это приводит к снижению температуры растепленного в теплый сезон приповерхностного грунтового слоя до отрицательных значений.

В связи с этим охлажденные грунты акватории Байдарацкой губы подразделяются авторами на многолетние и сезонные разновидности. Поскольку показанное на рис. 4 положение нулевой изотермы в разрезе было проведено по данным, полученным в течение периода, близкого к пику наиболее теплого сезона, можно предположить, что существенно глубже она опускаться не может. Соответственно, охлажденные образования, залегающие ниже зафиксированных отметок положения изотермы $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, сохраняют отрицательную температуру в течение всего года. Это позволяет рассматривать их как многолетние, а саму изотерму как кровлю многолетнеохлажденной толщи.

Грунты, залегающие выше по разрезу от нулевой изотермы, имели во время проведения измере-

ний положительную температуру. Предполагается, что в периоды, когда температура придонных вод приобретает отрицательные значения, большая часть данных образований переходит в сезонноохлажденное состояние (также возможно их сезонное промерзание).

Особо следует отметить, что наблюдаемое в течение последних десятилетий общее потепление климата приводит к растеплению и интенсификации таяния современной криолитозоны в прибрежных районах Карского моря [Криосфера..., 2006; Васильев и др., 2016]. В связи с этим можно предположить, что нынешнее положение нулевой изотермы несколько ниже глубины ее залегания в разрезе, зафиксированной в 1994 г. Однако, поскольку в последующие годы повторные измерения в таком объеме не производились, оценить абсолютные величины вероятного изменения глубины залегания нулевой изотермы не представляется возможным.

ВЫВОДЫ

1. Многолетнемерзлые грунты Байдарацкой губы представляют собой локальный криореликтовый массив, сформированный в ходе сартанской регрессии. В составе этого криореликта присутствуют пластично-мерзлые слабо- и средnezасоленные слабобльдистые суглинки и глины, а также сильнольдистые глинистые образования с атакситовой криотекстурой и ледогрунт. Среднегодовая температура этих образований изменяется от $-1.0\text{...}-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в верхней части разреза до $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ в нижней части.

2. Сезонномерзлые грунты по условиям залегания и распространения, а также по своему генезису подразделяются на два типа. Первый из них приурочен к прибрежным мелководным районам, где сезонномерзлые грунты слагают маломощные “kozyрки”, выклинивающиеся в мористом направлении. Они формируются в холодные периоды года на участках, где припайный лед касается дна. Второй тип сезонномерзлых отложений представлен локальными тонкими линзами. Их образование связано с теплообменом между придонным горизонтом морской воды (температура которой в холодные периоды года ниже температуры начала замерзания грунта) и приповерхностными донными отложениями.

3. Охлажденные грунты были выделены по данным приповерхностного термостатического зондирования в мористой глубоководной части губы. Здесь положение нулевой изотермы прослежено на глубинах от 3.0 до 8.4 м ниже дна на участке протяженностью около 51 км по данным, полученным в наиболее теплый сезон года. Грунты, залегающие на глубинах ниже этой изотермы, сохраняют отрицательную температуру весь год и относятся к охлажденным многолетним.

4. Грунты, залегающие выше по разрезу от нулевой изотермы, имели на момент измерений положительную температуру. В холодные периоды года, в результате теплообмена с придонным горизонтом морской воды с отрицательной температурой, они, вероятно, переходят в сезонно-охлажденное или, местами, в сезонномерзлое состояние.

Литература

Баду Ю.Б. Криогенная толща газоносных структур Ямала. О влиянии газовых залежей на формирование и развитие криогенной толщи. М., Науч. мир, 2018, 232 с.

Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Динамика субаквальной мерзлоты Карского моря в меняющихся климатических условиях // Материалы пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 2, ч. 5, с. 26–30.

Геокриологические условия Харасавэйского и Крузенштернского газоконденсатных месторождений (полуостров Ямал) / Ред. В.В. Баулин, Г.И. Дубиков, В.И. Аксенов и др. М., GEOS, 2003, 180 с.

ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2020, 41 с.

ГОСТ Р 58961-2020. Грунты. Метод полевых испытаний мерзлых грунтов термостатическим зондированием. М., Стандартинформ, 2020, 15 с.

ГОСТ 26428-85. Почвы. Метод определения анионно-катионного состава водной вытяжки. М., Госкомстандарт, 1985, 6 с.

ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. М., Госкомстандарт, 1985, 6 с.

Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части западного Ямала. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1987, 112 с.

Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Состояние и засоленность грунтов прибрежных участков Карского моря // Материалы I конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, кн. 1, с. 213–222.

Дубровин В.А., Крицук Л.Н., Полякова Е.И. Температура, состав и возраст отложений шельфа Карского моря в районе геокриологического стационара Марре-Сале // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 3–16.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 1 / Под ред. Ю.К. Васильчука, Г.В. Крылова, Е.Е. Подборного. Тюмень, ТюменНИИгипрогаз; СПб., Недра, 2006, 347 с.

Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал–Центр. М., GEOS, 1997, 442 с.

Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С. и др. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инж. изыскания, 2009, № 10, с. 38–41.

Романовский Н.Н. Талики в области многолетнемерзлых пород и схема их подразделения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геология, 1972, № 1, с. 23–34.

СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. М., МинРегион РФ, 2011, 123 с.

Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины / Ред. В.С. Волкова, А.Е. Бабушкин. Новосибирск, СНИИГиМС, 2000, 64 с.

Шполянская Н.А. Плейстоцен-голоценовая история развития криолитозоны Российской Арктики “глазами” подземных льдов. М.; Ижевск, Ин-т компьютер. исслед., 2015, 344 с.

Angelopoulos M., Overduin P., Frederieke M. et al. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost // Permafrost. Periglac. Process., 2020, vol. , No. 3, p. 341–457.

Osterkamp T.E. Subsea permafrost // Encyclopedia of Ocean Sciences / J.H. Steele, S.A. Thorpe, K.K. Turekian (eds.). N.Y., Academic Press, 2001, p. 2902–2912.

References

Badu U.B. Kriogennaya tolshcha gazonosnykh struktur Yamala [Cryogenic strata of gas-bearing structures of the Yamal Peninsula. About an influence of gas accumulations on genesis of cryogenic strata and its evolution]. Moscow, Nauchnyi mir, 2018, 232 p. (in Russian).

Vasiliev A.A., Streletskaia I.D., Oblogov G.E., Shirokov P.S. Dynamics of submarine permafrost of the Kara Sea under changing climatic conditions. In: The Proc. of the 5th Conf. of Russian geocryologists (Moscow, 14–17 June, 2016). Moscow, Universitetskaya kniga, 2016, vol. 2, pt 5, p. 26–30 (in Russian).

Geokriologicheskie usloviya Kharasaveiskogo i Kruzenshternskogo gazokondensatnykh mestorozhdenii (Yamal) [Geocryological conditions of Kharasavey and Kruzenshtern Gas Condensate Fields (Yamal peninsula)]. V.V. Baulin, G.I. Dubikov, V.I. Aksenov et al. (eds.). Moscow, GEOS, 2003, 180 p. (in Russian).

GOST 25100-2020. Soils. Classification. Moscow, Standardinform, 2020, 41 p. (in Russian).

GOST R 58961-2020. Soils. A technique of the frozen soils test using thermostatic method. Moscow, Standartinform, 2020, 15 p. (in Russian).

GOST 26428-85. Soils. Methods of determination of cation-anion content in water extract. Moscow, Goscomstandart, 1985, 6 p. (in Russian).

GOST 26423-85. Soils. Methods of determination of electric resistivity, pH, and solid residue in water extract. Moscow, Goscomstandart, 1985, 6 p. (in Russian).

Grigor'ev N.F. Kriolitozona pribrezhnoi chasti Zapadnogo Yanala [A cryolithozone of the west Yamal seashore area]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1987, 112 p. (in Russian).

Dubikov G.I., Ivanova N.V. Condition and salinity of the Kara Sea seashore soils. In: Materials from I Geocryology Conference in Russia. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1996, vol. 1, p. 213–222 (in Russian).

Dubrovina V.A., Kritsuk L.N., Polyakova E.I. Temperature, composition and age of the Kara Sea Shelf sediments in the area of the Marre-Sale geocryological station. Earth's Cryosphere, 2015, vol. XIX, No. 4, p. 3–16.

Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal [Cryosphere of oil and gas condensate fields of Yamal peninsula]. Yu.K. Vasil'chuk, V. Krylov, E.Ye. Podborny (eds.). Tyumen, TyumenNIIGiprogas; St. Petersburg, Nedra, 2006, vol. 1, 347 p. (in Russian).

Prirodnye usloviya Baidaratskoi guby [The Environmental Conditions of the Baydara Bay. The Basic Results of Studies for Pipeline “Yamal–Center” Underwater Crossing Design]. Moscow, GEOS, 1997, 442 p. (in Russian).

- Rokos S.I., Dlugach A.G., Loktev A.S. et al. Permafrost deposits of the Pechora and Kara Seashelf: genesis, composition, and occurrence. *Inshenernye Izyskaniya [Engineering Surveys]*, 2009, No. 10, p. 38–41.
- Romanovsky N.N. Talics at the permafrost distribution and their classification scheme. *Vestnik Mosk. un-ta. Ser. Geologiya [An issue of the Moscow State University. Geology]*, 1972, No. 1, p. 23–24.
- CP (Code of Practice) 25.13330.2012. Basements and Foundations in permafrost. Updated edition of SNiP 2.02.04-88. Moscow, MinRegion RF, 2011, 123 p. (in Russian).
- Unifitsirovannaya regional'naya stratigraficheskaya schema chetvertichnykh otlozhenii Zapadno-Sibirskoi ravniny [Unified stratigraphic chart of the Quaternary deposits of the Western Siberian Plain]. V.S. Volkova, A.E. Babushkin (eds.). Novosibirsk, SNIIGGiMS, 2000, 64 p. (in Russian).
- Shpolyanskaya N.A. The Pleistocene–Holocene history of cryolithozone of Russian Arctic in terms of subsurface ice evolution. Moscow; Izhevsk, Institute of Computer Science, 2015, 344 p. (in Russian).
- Angelopoulos M., Overduin P., Frederieke M. et al. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost. *Permafrost. Periglac. Process.*, 2020, vol. 31, No. 3, p. 341–457. – <https://doi.org/10.1002/ppp.2061>
- Osterkamp T.E. Subsea permafrost. In: *Encyclopedia of Ocean Sciences*. J.H. Steele, S.A. Thorpe, K.K. Turekian (eds.). N.Y., Academic Press, 2001, p. 2902–2912.

*Поступила в редакцию 18 ноября 2022 г.,
после доработки – 2 июля 2023 г.,
принята к публикации 30 августа 2023 г.*