

КРИОЛИТОГЕНЕЗ

УДК 551.345; 557.79
DOI: 10.15372/KZ20250102
EDN: DXJDHS

**ЛЕДЯНОЙ ПОКРОВ ЗАЛИВА ШАРАПОВ ШАР (КАРСКОЕ МОРЕ)
И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ МЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ДНЕ**

С.В. Годецкий*, Д.М. Богатова, О.А. Ликутова, А.П. Вергун, С.А. Огородов, Н.Г. Белова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*

**Автор для контакта; e-mail: mail@godetskiystas.ru*

Рассмотрены условия формирования ледяного покрова в заливе Шарапов Шар Карского моря, определена его роль в формировании мерзлых пород в контактной зоне лед–дно на подошве припая. На основе данных натурных измерений, дистанционного зондирования и расчетов проанализированы ледовые условия за последние 46 лет: сроки формирования и разрушения ледяного покрова, характерная толщина льда. Установлено, что припай в заливе может наблюдаться в среднем на протяжении 252 дней, его максимальная толщина к концу зимы составляет 139 см, в отдельные зимы может превышать 160 см. На значительной части залива подошва морского льда соприкасается с дном: в мягкие зимы эта область занимает 49 % от всей площади залива, в суровые – 60 %. Численное моделирование показало, что на глубинах более 0.9 м под припаем образуется сезонномерзлый слой толщиной до 0.8 м для суглинистых пород и 1.2 м для песчаных, полностью протаивающий в летний период. Из результатов расчетов следует, что в XX в. имели место условия, благоприятные для формирования многолетнемерзлых пород в зоне смерзания морского льда с донными породами. Образование многолетнемерзлых пород возможно на глубинах до 90 см. В XXI в. рост температуры воздуха и увеличение безледного периода приводят к деградации многолетнемерзлых пород. В современных условиях потепления климата песчаные породы могут сохраняться в многолетнемерзлом состоянии до глубин моря 0.7 м, глинистые – до 0.3 м.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, криолитозона, морской лед, припай, моделирование температурного режима пород.

Ссылка для цитирования: Годецкий С.В., Богатова Д.М., Ликутова О.А., Вергун А.П., Огородов С.А., Белова Н.Г. Ледяной покров залива Шарапов Шар (Карское море) и его влияние на формирование мерзлых пород на дне // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 14–24. DOI: 10.15372/KZ20250102. EDN: DXJDHS.

**ICE COVER IN SHARAPOV SHAR LAGOON (THE KARA SEA)
AND ITS IMPACT ON FREEZING OF BOTTOM SEDIMENTS**

S.V. Godetskiy*, D.M. Bogatova, O.A. Likutova, A.P. Vergun, S.A. Ogorodov, N.G. Belova

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

**Corresponding author; e-mail: mail@godetskiystas.ru*

This article is devoted to studying the conditions for the formation of ice cover in Sharapov Shar Bay and determining its role in the formation of frozen sediments in the ice-bottom contact zone at the fast ice bottom. The characteristic periods of formation and destruction of ice cover, as well as ice thickness, were obtained based on the main analysis of time series of field data, remote sensing data and calculations over a period of 46 years. It has been established that fast ice in Sharapov Shar Bay can be observed for an average of 252 days. The ice thickness by the end of winter averages 139 cm, and in some winters it can exceed 160 cm. In a significant part of the bay, the base of the sea ice is in contact with the bottom: in mild winters this area occupies 49 % of the entire bay area, in severe winters – 60 %. Numerical modeling showed that at depths of more than 0.9 m, a seasonally frozen layer is formed under the fast ice with a thickness of up to 0.8 m for loamy soils and 1.2 m for sandy soils. The seasonally frozen layer completely thaws in summer. Calculations also showed that in the 20th century there were conditions favorable for the formation of permafrost in the zone where sea ice is frozen to the bottom. The formation of permafrost is possible at depths of up to 90 cm. In the 21st century, rising air temperatures and increasing ice-free periods lead to permafrost degradation. With the current observed climate warming, sandy soils can remain in a permafrost state to sea depths of 0.7 m, clayey soils – up to 0.3 m.

Keywords: frozen ground, permafrost zone, sea ice, fast ice, simulation of ground freezing.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные участки берегов и шельфа арктических морей России заняты многолетнемерзлыми (в том числе субаквальными) породами (ММП), которые чувствительны к климатическим изменениям. Сокращение продолжительности ледового сезона и повышение температуры воздуха и воды влияют на формирование и сохранение ММП и сезонномерзлых пород (СМП). Без знания характеристик пород, слагающих дно и берега арктических морей, невозможно промышленное освоение северных территорий. Поэтому изучение взаимосвязи изменений ледового режима и формирования мерзлых пород становится актуальным. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

Последний этап деградации шельфовой криолитозоны начался 7–8 тыс. лет назад и продолжается до сих пор [Романовский и др., 1999]. За последние 30 лет деградация субаквальных ММП в морях Российской Арктики значительно ускорилась, достигая 18 см/год [Сергиенко и др., 2012; Семилетов и др., 2020].

Одним из факторов формирования подводных СМП и ММП является ледяной покров. Наличие ММП под пляжем, на лайдах и в области смерзания донных отложений с морским льдом отмечено многими исследователями [Григорьев, 1987; Жигарев, 1997], в том числе в районе мыса Харасавей [Васильев и др., 2011, 2017]. Кроме того, в районе м. Бурунного (Байдарацкая губа Карского моря) на подводной косе (отмели) при глубине моря 2–3 м обнаружены мерзлые породы, имеющие температуру -9.9°C , которые выклиниваются на расстоянии 2.3 км от берега [Булдович, Данилов, 1998]. В статье [Jones et al., 2009] также упоминается о новообразовании ММП на некоторых мелководных участках м. Халкет (Аляска, море Бофорта), связанном с формированием наносов (кос).

По данным моделирования [Булдович, Данилов, 1998], на мелководьях Байдарацкой губы до глубин 2–3 м формируются ММП с температурой $-8\ldots-10^{\circ}\text{C}$, а на глубинах от 2–3 до 6–8 м распространены талые или сезонно-мерзлые породы. Потепление климата, наблюдаемое с конца XX в. и особенно ярко проявляющееся в Арктике [Огородов и др., 2022], очевидно, негативно скажется на подводных ММП, вплоть до их деградации.

Залив Шарапов Шар расположен в западной части Карского моря (рис. 1). Глубина акватории преимущественно составляет 2–3 м. С запада залив защищен от прямого воздействия волн и льда аккумулятивными островами Шараповы Кошки, образующими лагунно-отмелый берег. Восточный берег залива характеризуется наличием термоабразионного и абразионно-термоденудационного уступов в рыхлых мерзлых породах с преимуще-

ственно песчаным пляжем. Дно и берега залива сложены мелкозернистыми песками, алевролитами и пелитами [Мотычко и др., 2013].

Высота значительных волн в заливе не превышает 110 см для штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет. Приливные колебания выражены слабо: сизигийная высота прилива составляет 23 см, скорости приливных течений около 5 см/с. Суммарные течения во время штормов не превышают 50 см/с [Макаров, Вялый, 2020]. Ледяной покров формируется в спокойных условиях, когда перемещение молодых форм льда незначительно, а процессы торошения и образования стамух наблюдаются локально. Как следствие, залив практически полностью покрывается ровным однолетним льдом [Думанская, 2014].

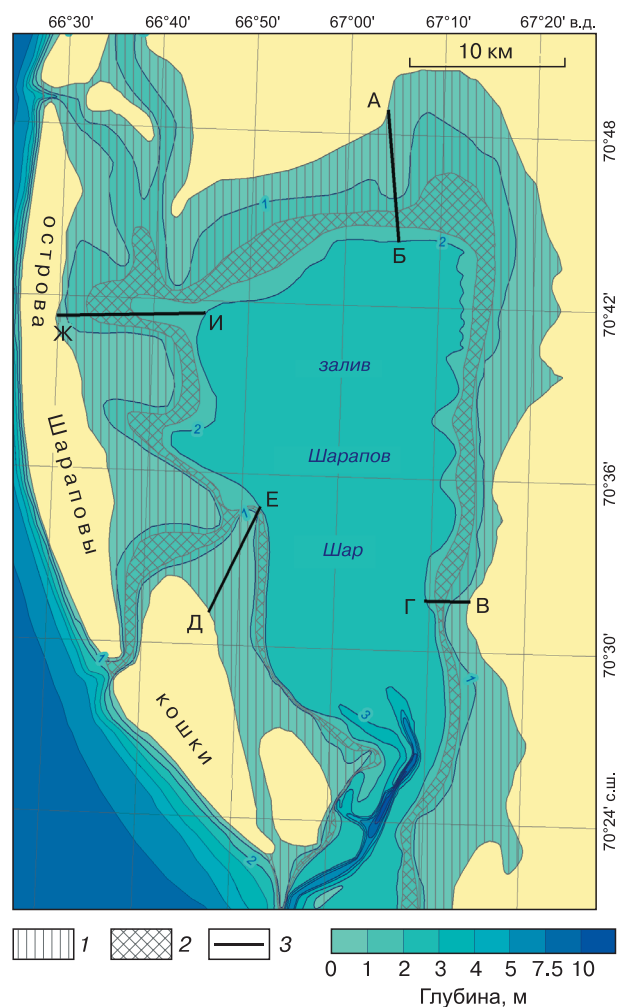


Рис. 1. Батиметрическая карта залива Шарапов Шар.

Штриховкой показаны границы максимального распространения области соприкосновения нижней границы морского льда со дном, установленные на основании расчетной толщины морского льда для условий мягкой (1) и суровой (2) зимы; линиями 3 – показано местоположение профилей моделирования.

Большая часть залива расположена в пределах Крузенштернского месторождения – одного из ключевых объектов нефтегазового освоения в Арктике, в рамках разработки которого обсуждается обустройство скважин на искусственных островах [Макаров, Вялый, 2020; Соломатин, Козлов, 2021]. Для оценки устойчивости гидротехнических сооружений важно знать характеристики донных осадков и их состояние (мерзлое, охлажденное, талое).

Цель представленной работы – оценить роль припайного льда в формировании мерзлых пород в шельфовой зоне на примере залива Шарапов Шар. До настоящего времени не проводилось исследований, направленных на изучение взаимосвязи климатического изменения сроков образования и толщины морского льда с процессом формирования СМП и ММП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА И ПРОМЕРЗАНИЯ ДОННЫХ ПОРОД

Сроки наступления *фаз ледового режима* (устойчивое ледообразование, образование припая, взлом припая и полное очищение акватории ото льда) в заливе Шарапов Шар определены за период 2000–2023 гг. на основе анализа спутниковых снимков [https://worldview.earthdata.nasa.gov]. Terra (MODIS) (октябрь–ноябрь, май–июль 2000–2023 гг.); Sentinel-1a (октябрь–ноябрь, апрель, июнь 2014–2023 гг.).

Толщина морского льда в заливе рассчитана на основе сумм градусо-дней мороза (СГДМ) по данным гидрометеорологической станции (ГМС) Марресале сети Росгидромета за период с 1977 по

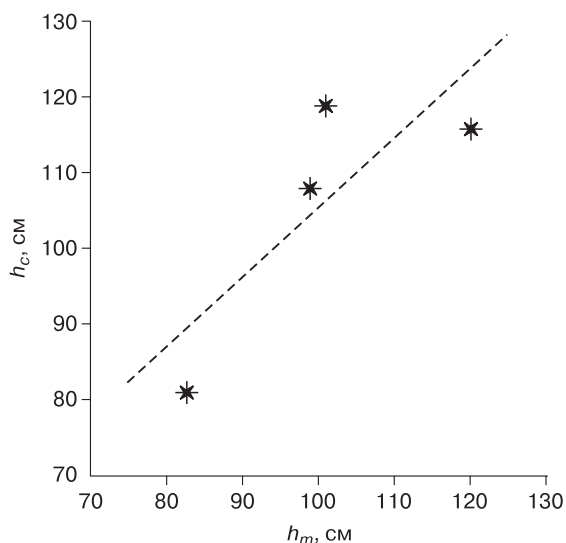


Рис. 2. Сравнение измеренной (h_m) и расчетной (h_c) толщины льда.

2023 г., за исключением зимних сезонов 1978/79, 1979/80, 1980/81 и 2001/2002 гг. [https://rp5.ru, http://aisori-m.meteo.ru].

Пересчет СГДМ в толщину льда проводится по формуле Н.Н. Зубова [1956], показавшей адекватную корреляцию с данными *in situ*, полученными в ходе бурения в период максимального развития ледяного покрова (март–апрель) в 2011–2023 гг. (рис. 2).

Для оценки *положения границы области, где припай соприкасается с дном*, построена батиметрическая карта залива Шарапов Шар (см. рис. 1). Цифровая модель рельефа дна была получена из данных Общей батиметрической карты Мирового океана (GEBCO) [https://www.gebco.net] морских навигационных карт и локальных съемок. Все глубины приводились к Балтийской системе высот 1977 г. (БС77), а затем привязывались к среднемуголетному уровню моря (СУМ). В заливе СУМ, по данным ГМС Харасавей (1977–1987 гг., после 1987 г. ГМС упразднена), составляет 63 см БС77.

Численное моделирование промерзания донных пород под морским льдом проводилось в программе QFrost [Основы..., 1999]. В настоящей работе не рассматривается история формирования пород залива Шарапов Шар, их криогенное строение и развитие ММП в неоплейстоцене–голоцене, в отличие от работ [Романовский, Тумской, 2011; Котляков и др., 2015; Tumskoy, Kuznetsova, 2022]. Теплотокки из недр Земли, обычно используемые при моделировании шельфовых ММП за длительные периоды [Романовский и др., 1999, 2003], не учитывались ввиду меньших моделируемых глубин.

При моделировании использовались теплофизические параметры грунтов, приведенные в табл. 1 [Алехютина, Мотенко, 2017], характерные для грунтов с высокими значениями влажности (30–50 %) и плотности скелета (1.3–1.6 г/см³), типичными для водонасыщенных донных осадков. Тз-за отсутствия фактических данных рассматривался однослойный разрез грунта. Грунты шельфа Карского моря засолены, температура их замерза-

Таблица 1. Теплофизические свойства грунтов, используемые при моделировании

Грунт	$\lambda_{\text{г}}$	$\lambda_{\text{м}}$	$C_{\text{г}}$	$C_{\text{м}}$	$\frac{Q_{\text{фаз}}}{\text{МДж/м}^3}$
	Вт/(м·К)		Дж/(м ³ ·К)		
Песчаный	1.8	2.0	2800	2000	152.4
Суглинистый	1.45	1.55	2865	2250	289.3

Примечание. λ_t , λ_m – коэффициенты теплопроводности грунтов в талом и мерзлом состоянии соответственно; C_t , C_m – объемная теплоемкость грунта в талом и мерзлом состоянии соответственно; $Q_{\text{фаз}}$ – теплота фазового перехода.

ния принималась равной -1.5°C [Васильев и др., 2016]. Начальное температурное распределение пород принималось на основе данных наблюдений на стационаре Марресале [Дубровин и др., 2015]. Температура на глубине нулевых годовых амплитуд составляла -1.4°C . Расчеты проводились в два этапа: сначала проводилось моделирование для последних 30 лет XX в., когда предполагалось, что на момент начала расчетов породы находятся в охлажденном состоянии, а затем полученные характеристики пород использовались как начальные условия для моделирования в XXI в. Ввиду мелководности залива и того, что ледяной покров ложится на дно, было решено рассчитывать одномерные задачи с различными граничными условиями на поверхности.

Для моделирования температурного режима донных отложений в XX в. использовались среднемесячные данные по температуре воздуха, мощности снежного покрова и толщине морского льда за период 1970–1999 гг. (табл. 2). Для расчета теплопроводности снега использовалась формула Проскурякова [Осокин и др., 2017], для упрощения взято фиксированное значение плотности снега (250 кг/м^3). При этом коэффициент теплопроводности морского льда, принимаемый в расчетах, был постоянным и составлял $2.1\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Ледовый покров в заливе Шарапов Шар формируется постепенно: припай образуется у берега и нарастает в течение всего холодного сезона, поэтому зимой в заливе существуют области, где лед лежит на дне, а дальше от берега (на больших глу-

бинах) между льдом и дном есть прослойка воды. Таким образом, учет наличия воды и льда при моделировании использовался через задание на поверхности грунтов различных граничных условий. В расчетах было сделано допущение, что припайный лед начинает формироваться от берега, а с увеличением глубины моря мощность припая растет, но время контакта с дном сокращается. Были приняты граничные условия третьего рода, которые включают температуру и коэффициент теплообмена. Для каждого месяца каждого года использовались температура воздуха и коэффициент теплообмена. Коэффициент теплообмена (α , $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$) рассчитывался с учетом мощности льда (при допущении, что она равна глубине залива). Коэффициент теплообмена обратно пропорционален термическому сопротивлению ($\alpha = 1/\Sigma R$, где R – термическое сопротивление), которое рассчитывается как отношение мощности слоя к его коэффициенту теплопроводности ($R = h_{\text{слоя}}/\lambda_{\text{слоя}}$).

В зимний период стратификация воды подо льдом отсутствует, температура воды подо льдом близка к температуре замерзания -1.8°C . Осредненные значения температуры воздуха T_{air} с 1977 по 1999 г. по данным ГМС Марресале и коэффициенты теплообмена α для разных глубин моря, использованные как верхние граничные условия на начальном этапе моделирования, приведены в табл. 3. Так как моделирование осуществлялось для первых десятков метров разреза, тепловой поток из недр в качестве нижнего граничного условия был приравнен к 0 Вт/м^2 .

Таблица 2. Характеристики морского льда и снега в заливе Шарапов Шар в 1970–1999 гг.

Характеристика	Месяц							
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI
Толщина морского льда, см	30	60	87	106	114	124	132	122
Высота снега, см	4.6	8.9	12.9	21.0	23.0	26.7	22.8	6.5
Термическое сопротивление снега, ($\text{м}^2\cdot\text{К}$)/Вт	0.17	0.32	0.47	0.77	0.84	0.98	0.84	0.24

Таблица 3. Граничные условия для разной глубины моря на начальном этапе моделирования

h , см	Параметр	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
30–135	T_{air}	–21.5	–22.4	–17.0	–13.6	–5.3	2.1	7.7	6.8	3.3	0	–13.0	–18.1
30	α	1.624	1.100	1.018	0.894	1.022	2.616	∞	∞	∞	∞	3.225	2.139
60	α	1.318	0.951	0.889	0.793	0.892	1.904	∞	∞	∞	∞	∞	1.638
90	α	1.109	0.837	0.789	0.712	0.791	1.497	∞	∞	∞	∞	∞	∞
105	α	∞	0.790	0.747	0.678	0.749	1.352	∞	∞	∞	∞	∞	∞
115	α	∞	∞	0.721	0.657	0.723	1.271	∞	∞	∞	∞	∞	∞
125	α	∞	∞	∞	0.637	0.699	1.198	∞	∞	∞	∞	∞	∞
135	α	∞	∞	∞	∞	0.676	1.133	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Примечание. T_{air} – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; h – глубина моря, см.

Для периода с 2001 по 2022 г. в качестве верхних граничных условий использовались средние значения температуры воздуха и коэффициенты теплообмена для каждого месяца каждого года.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ледовый режим. В результате анализа данных дистанционного зондирования за 22 ледовых сезона XXI в. установлено, что в среднем устойчивое ледообразование в заливе начинается во II декаду октября. Формирование припая в заливе Шарапов Шар обычно начинается через одну–две недели после начала ледообразования. Вначале образуется ледяной заберег шириной до 200 м у берегов. Минимальное количество дней для установления припая в 2016 г. составило 3 дня, максимальное – 13 дней в 2017 и 2021 гг. В среднем припай образуется в III декаде октября при толщине льда 10–15 см.

К маю ледовая обстановка достигает максимального развития. Таяние и разрушение ледяного покрова происходит под воздействием солнечной радиации и тепла, приносимого течениями и воздушными массами. В начале мая температура воздуха становится положительной, ледообразование прекращается. Первые признаки таяния льда – появление снежиц на поверхности льда, которые, разрастаясь, образуют воду на льду. Ин-

тенсивное таяние льда происходит в июне. Взлом припая происходит в среднем в III декаде июня.

Очищение акватории залива Шарапов Шар ото льда начинается в конце июня – начале июля. Акватория залива после взлома припая очищается достаточно быстро, за несколько дней. Локальные торосы и стамухи разрушаются обычно за одну–две недели после взлома припая. Полное очищение акватории ото льда происходит в I декаде июля.

Сводные данные о сроках наступления ледовых фаз в заливе Шарапов Шар приведены в табл. 4.

Для залива Шарапов Шар характерно наличие устойчивого припая в течение всей зимы: от 217 до 271 дней, в среднем – 252 дня за год. Таким образом, неподвижный ледовый покров наблюдается 7.5–9 месяцев в году. С учетом дрейфующего льда ледовый сезон в заливе Шарапов Шар продолжается от 232 до 283 дней, в среднем 263 дня.

Толщина льда. По результатам расчетов СГДМ и основанной на них типизации зим за 42 ледовых сезона [Думанская, 2014], самой суровой оказалась зима 1998/99 г. (–4556 °С), самой теплой – 2019/20 г. (–2212 °С). Всего было отмечено 8 суровых зим и 10 мягких. При этом на XXI в. приходится только 2 суровых зимы и 9 мягких. Характерные значения СГДМ для умеренных, суровых и мягких зим приведены в табл. 5.

Таблица 4. Сроки наступления ледовых фаз в заливе Шарапов Шар

Ледовая фаза	Срок наступления		
	ранний	средний	Поздний
Устойчивое ледообразование	I декада октября (2013, 2014, 2015 гг.)	II декада октября	I декада ноября (2016, 2022 гг.)
Образование припая	II декада октября (2014, 2015 гг.)	III декада октября	I декада ноября (2016, 2022 гг.)
Взлом припая	I декада июня (2020 г.)	III декада июня	I декада июля (2019 г.)
Полное очищения ото льда	III декада июня (2015, 2016, 2020, 2023 гг.)	I декада июля	II декада июля (2014, 2017, 2019 гг.)

Таблица 5. Средние значения сумм градусо-дней мороза (СГДМ) для суровых, умеренных и мягких зим по данным ГМС Марресале за 1977–2023 гг.

Тип зимы		Количество зим	СГДМ, °С
Самая суровая		1	–4556
Суровая	без самой суровой	8	–3968
	с учетом самой суровой	9	–4042
Умеренная		22	–3278
Мягкая	без самой теплой	10	–2626
	с учетом самой теплой	11	–2588
Самая теплая		1	–2212

Таблица 6. Расчетные значения толщины морского льда и площади области соприкосновения морского льда с дном в заливе Шарпов Шар для мягкой и суровой зим

Тип зимы	СГДМ, °С	Толщина льда, см	Площадь области соприкосновения подошвы припая с дном	
			км ²	% от общей площади залива
Мягкая	–2588	121	582	49
Суровая	–4042	157	716	60

Расчетная толщина льда в самый холодный сезон составила 167 см, в самый теплый – 110 см. На батиметрической карте залива Шарпов Шар (см. рис. 1) показаны границы соприкосновения подошвы льда с дном для суровой и мягкой зим. Максимальная площадь соприкосновения льда в суровую зиму 60 % от общей площади залива, в мягкую – 49 % (табл. 6).

Результаты моделирования промерзания пород. Формирование сезонномерзлого слоя (СМС) для XX в. возможно при всех мощностях ледового покрова. Чем больше толщина льда и чем позже он ложится на дно, тем меньше толщина СМС. Авторами установлено, что при условии формирования припая в декабре при толщине льда более 90 см песчаные донные породы не переходят в многолетнемерзлое состояние. Для суглинистых пород эта граница составляет 80 см льда из-за их большей теплоемкости. Мощность СМС варьируется от 0.2 до 1.2 м для песчаных пород и до 0.8 м для глинистых (рис. 3).

При одинаковой мощности льда (90 см) глубина сезонного промерзания отличается на 20 % в зависимости от времени формирования льда (см. рис. 3). На глубинах до 0.8–0.9 м лед формируется раньше, а припай образуется к ноябрю (толщина льда 30 см) и декабрю (более 60 см).

Согласно результатам моделирования, образование льда и его смерзание с донными осадками в начале холодного периода формируют благоприятные условия для новообразования многолетнемерзлых пород в XX в. Расчетная мощность ММП за период 1970–1999 гг. достигала 3.5–6.6 м (рис. 4). Формирование морского льда происходит в течение всего зимнего периода. Поскольку растет с увеличением глубины залива. Поскольку припайный лед начинает формироваться от берега, в расчетах были сделаны некоторые допущения. Например, в ноябре формируется слой льда мощностью 30 см и ложится на дно на глубинах менее 30 см, тогда как на большей глубине морской лед отделен от дна слоем морской воды, в нашем случае с температурой –1.8 °С. Смыкающийся или не смыкающийся с дном лед учитывался как различные граничные условия. Осредненные значения температуры воздуха с 1977 по 1999 г. и коэффициенты теплообмена для различной мощности льда представлены в табл. 3.

По данным предыдущих исследований [Васильев и др., 2011] на низких берегах Западного Ямала, в том числе в районе м. Харасавей, наблюдалось новообразование ММП при глубинах моря до 1.5 м, в районе м. Бурунного (Байдарацкая губа Карского моря) на подводной косе (отмели) при глубине моря 2–3 м обнаружены при проведении полевых изысканий мерзлые породы, которые выклиниваются на расстоянии 2.3 км от берега [Булдович, Данилов, 1998]. В заливе Шарпов Шар моделирование показывает, что новообразование ММП возможно на меньших глубинах из-за большей засоленности и более низкой температуры замедления пород.

Летом породы оттаивают на толщину до 0.8 м для глинистых пород и до 1.2 м для песчаных, причем глубина протаивания не зависит от толщины льда (рис. 5).

Моделирование второго этапа показало, что ММП, которые могли сформироваться за последние 30 лет XX в., в XXI веке начинают оттаивать сверху при увеличении глубины сезонного протаивания (рис. 6). Мощность сезонного талого слоя (СТС) в песчаных породах больше, чем в глинист-

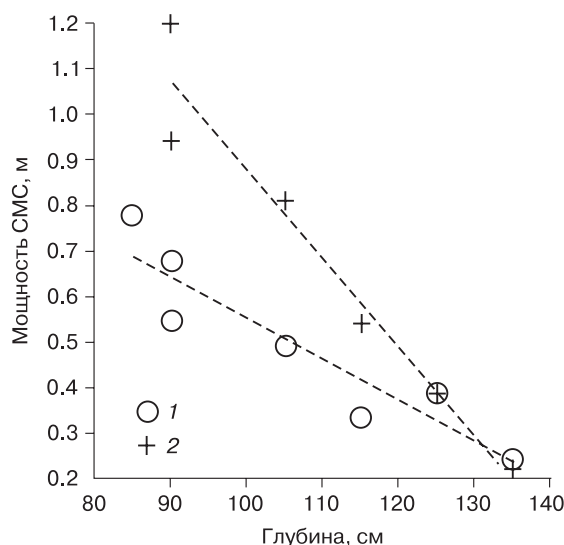


Рис. 3. Расчетная мощность сезонномерзлого слоя (СМС) под припаем на различной глубине моря для глинистых (1) и песчаных (2) грунтов.

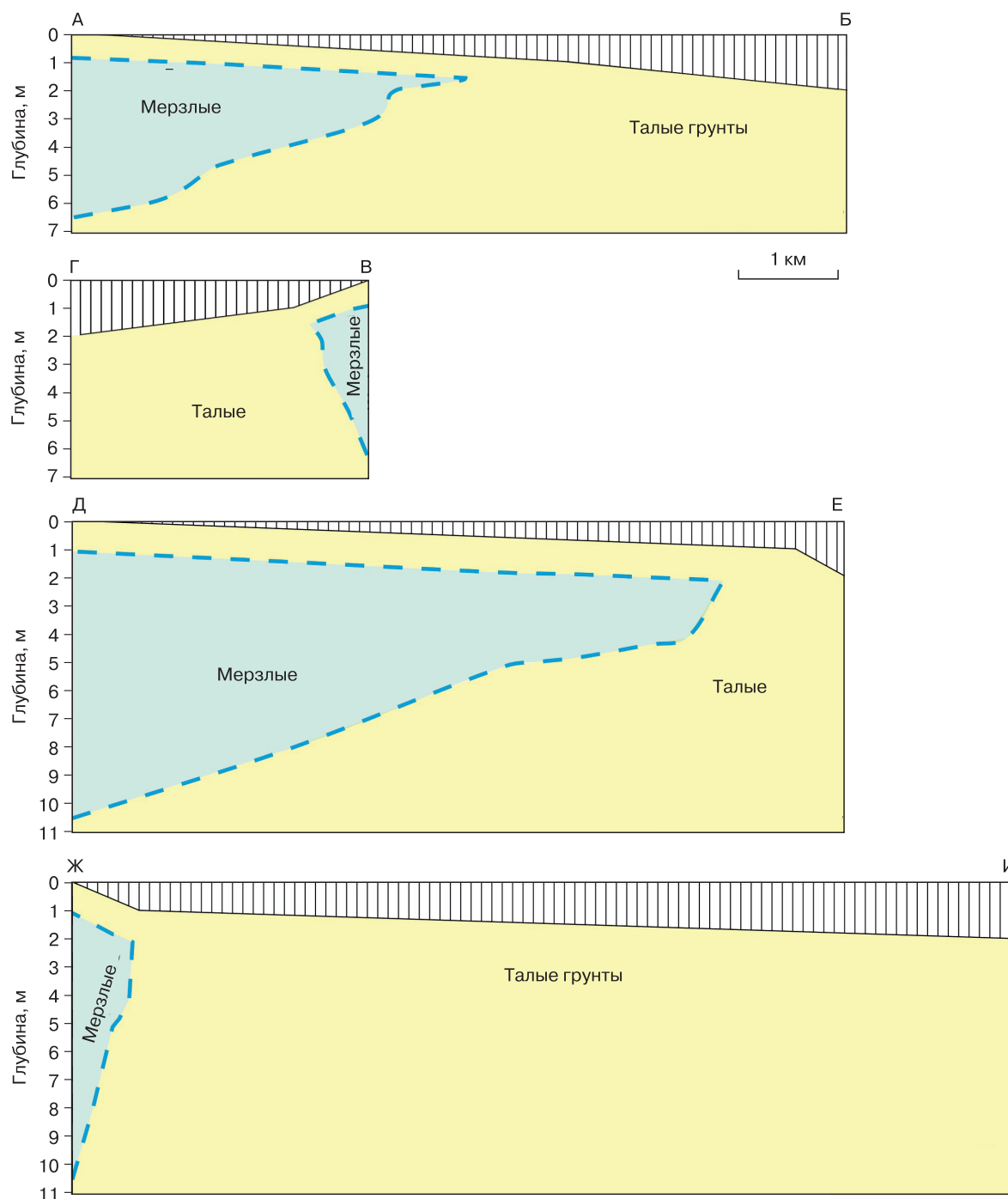


Рис. 4. Схематические разрезы, отражающие наличие многолетнемерзлых пород по данным моделирования за последние 30 лет XX в.

Разрезы А–Б, В–Г – глинистые грунты; Д–Е, Ж–И – песчаные грунты. Положение разрезов см. на рис. 1. Штриховкой обозначен морской лед.

тых, из-за различий в теплофизических свойствах. Полная деградация СМС и слияние СТС с кровлей возможной ММП отмечены для 2022 г., когда кровля ММП для песчаных пород находилась на 407 см при глубине моря 0.7 м, а для глинистых – на 220 см при глубине 0.3 м.

Темпы деградации ММП в XXI в. различаются для пород разного гранулометрического состава. В песчаных породах ММП может сохраниться до глубин моря 0.7 м, в глинистых – до 0.3 м. С 2015 г. глубина СТС значительно возросла по сравнению с 2001–2014 гг. Различия в мощностях СТС и СМС в периодах 2006–2009 и 2012–2013 гг. (см. рис. 6, 7) показывают, что промороженные зимой донные породы не успевают полностью протаять летом. То есть мы наблюдаем нестационарные условия, когда мощность СТС не равна мощности СМС. Только для двух указанных периодов это является условиями формирования ММП. В остальные периоды условий для формирования ММП не возникало. В последнее десятилетие мощность СТС всегда превышала мощность СМС.

М.Н. Григорьев [2006] приводит данные о деградации реликтовых субаквальных ММП на шельфе Восточной Сибири. Скорость деградации составляет от 1 до 10–15 см/год при контакте ММП с морской водой. В субаквальных условиях до глубин моря 2.5 м происходит новообразование ММП на мелководных авандельт и в мелководных заливах, где развит процесс аккумуляции осадков. Моделирование показало, что в заливе Шарапов Шар последние десятилетия XX в. климатические

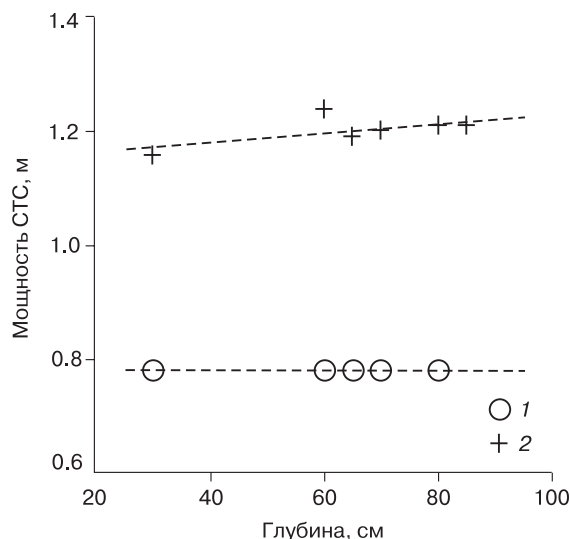


Рис. 5. Расчетная мощность сезонноталого слоя (СТС) в заливе Шарапов Шар на глубинах моря до 90 см для глинистых (1) и песчаных (2) грунтов.

условия были благоприятными для существования и даже локального новообразования ММП. В XXI в. вероятность возникновения ММП на акватории залива Шарапов Шар по данным моделирования отсутствует, а локальные очаги ММП, которые могли сформироваться в XX в., деградируют.

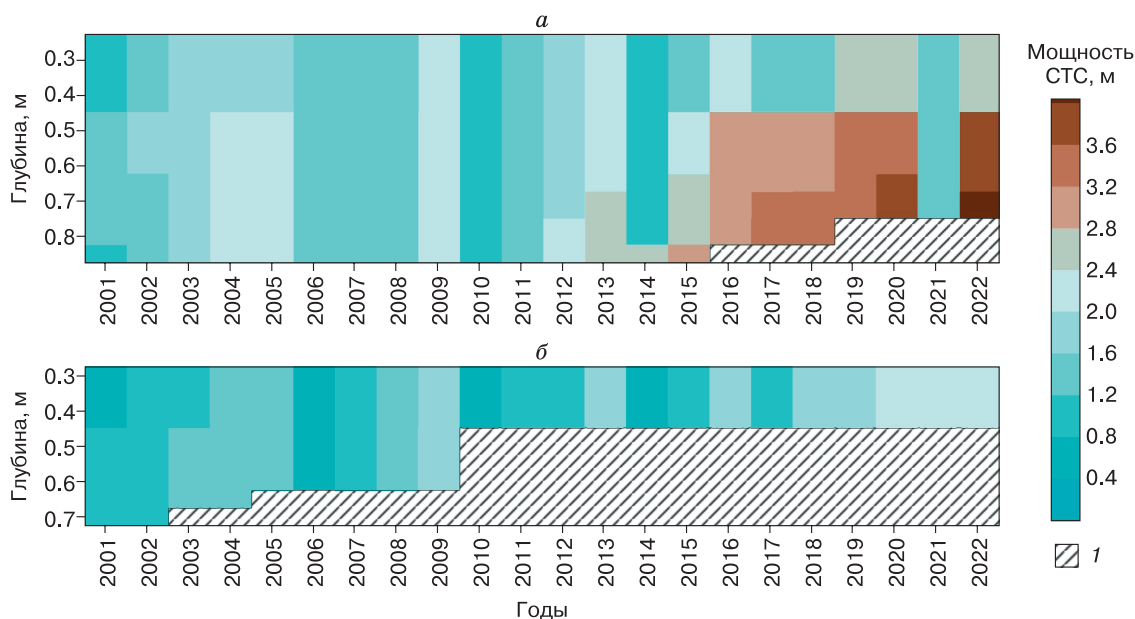


Рис. 6. Изменения мощности сезонноталого слоя, сложенного песчаными (а) и глинистыми (б) грунтами, на разных глубинах моря в 2001–2022 гг.

1 – полное оттаивание грунтов.

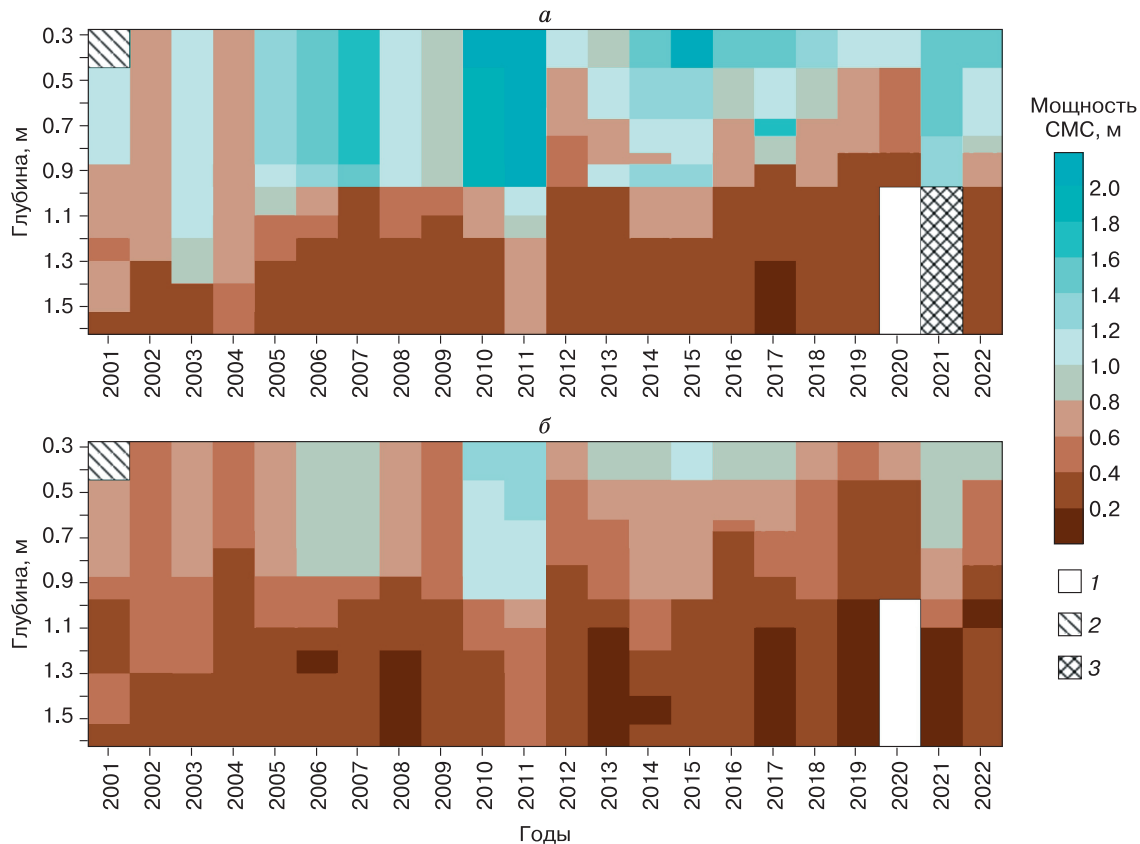


Рис. 7. Мощность сезонномерзлого слоя, сложенного песчаными (а) и глинистыми (б) грунтами, на разных глубинах моря в 2001–2022 гг.

1 – СМС отсутствует; 2 – СМС сливается с многолетнемерзлыми породами; 3 – двуслойное строение СМС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проанализированы многолетние данные дистанционного зондирования и натурных наблюдений за морским льдом, проведены расчеты толщины льда, составлена карта-схема ледяного покрова залива Шарапов Шар, на которой выделена зона смерзания морского льда с дном, проведено моделирование промерзания и оттаивания донных пород залива Шарапов Шар в период с 1973 по 2022 г. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Ледовый сезон в заливе Шарапов Шар продолжается в среднем со II декады октября до II декады июля. Устойчивый припай в заливе сохраняется на протяжении 252 дней в году – с конца октября по конец июня.

2. Максимальная годовая толщина льда колеблется от ~120 см в мягкие зимы до ~160 см в суровые.

3. В зимний период на 50 % акватории залива наблюдается смерзание льда с дном, в результате чего образуются сезонномерзлые породы.

4. Мощность сезонномерзлого слоя зависит от свойств пород. На глубинах моря более 80–

90 см мощность СМС варьирует в широком диапазоне от 0.2 до 1.2 м для песчаных пород и до 0.8 м для глинистых донных отложений. Сезонномерзлый слой полностью оттаивает за летний период.

5. Толщина слоя донных отложений, подверженного оттаиванию в летний период, не зависит от толщины льда, но зависит от свойств донных отложений. Для песчаных пород толщина слоя оттаивания составляет 120 см, для суглинистых – 80 см.

6. По данным моделирования, для климатических условий периода 2001–2022 гг. песчаные породы, при условии формирования локальных очагов ММП в XX в., могли сохраняться в многолетнемерзлом состоянии до глубин моря 0.7 м, в глинистых – до глубин 0.3 м.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-17-00097 “Опасные экзогенные процессы и техногенез на берегах и шельфе Печорского и Карского морей”). Участие С.В. Годацкого осуществлялось в рамках госбюджетной темы № 121051100167-1.

Литература

- Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г.** Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдаратской губы Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 13–25.
- Булдович С.Н., Данилов И.Д.** Температурное поле мелководных отложений арктических морей в полосе смерзания припайных льдов с донными грунтами // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 1, с. 62–67.
- Васильев А.А., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д. и др.** Температурный режим верхнего горизонта многолетнемерзлых пород в переходной области от суши к морю на примере Западного Ямала // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 4, с. 34–42.
- Васильев А.А., Стрелецкая Д.И., Широков Р.С., Облогов Г.Е.** Эволюция криолитозоны прибрежно-морской области Западного Ямала при изменении климата // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 56–64.
- Васильев А.А., Широков Р.С., Облогов Г.Е., Стрелецкая И.Д.** Динамика субаквальной мерзлоты Карского моря в меняющихся климатических условиях // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Универ. книга, 2016, т. 2, ч. 5–7, с. 5–11.
- Григорьев Н.Ф.** Криолитозона прибрежной части западного Ямала // Тр. Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР. Якутск, 1987, 111 с.
- Григорьев М.Н.** Морфология и динамика преобразования подводной мерзлоты в прибрежно-шельфовой зоне морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Наука и образование, 2006, № 4, с. 104–109.
- 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.
- Думанская И.О.** Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск, ИГ-СОЦИН, 2014, 608 с.
- Жигарев Л.А.** Океаническая криолитозона. М., Изд-во Моск. ун-та, 1997, 319 с.
- Зубов Н.Н.** О льдах Арктики и Антарктики. М., Изд-во Моск. ун-та, 1956, 118 с.
- Котляков В.М., Величко А.А., Глазовский А.Ф., Тумской В.Е.** Прошлое и современность криосферы Арктики // Вестн. РАН, 2015, т. 85, № 5/6, с. 463–471.
- Макаров К.Н., Вялый Е.А.** Моделирование деформаций откосов искусственного намывного острова // Гидротехника, 2020, № 1 (58), с. 30–33.
- Мотычко В.В., Опекунов А.Ю., Константинов В.М., Соколов Г.Н.** Морфолитогеenez и состав донных отложений Байдаратской губы // Вестн. СПбГУ. Сер. 7. 2013, вып. 1, с. 65–77.
- Огородов С.А., Шабанова Н.Н., Кессель А.С. и др.** Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2022, № 1, с. 26–42.
- Основы геокриологии.** Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1999, 526 с.
- Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А.** Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 60–68.
- Романовский Н.Н., Тумской В.Е.** Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны Восточной Арктики // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 3–14.
- Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В. и др.** Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 22–32.
- Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В. и др.** Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене–голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 51–64.
- Семилетов И.П., Шахова Н.Е., Сергиенко В.И. и др.** Деграция мерзлоты и нарушение баланса в цикле углерода в морях Восточной Арктики (потоки парниковых газов, экстремальная асидификация, геориски) // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: Тез. докл. Междунар. науч. конф. СПб., ААНИИ, 2020, с. 81–84.
- Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др.** Деграция подводной мерзлоты и разрушение гидратов на шельфе Восточно-арктических морей как потенциальная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. РАН, 2012, т. 446, № 1, с. 1132–1137.
- Соломатин С.В., Козлов Д.В.** Учет особенностей ледовых условий для повышения экологической эффективности проектов гидротехнического строительства на Российском Арктическом шельфе // Природообустройство, 2021, № 1, с. 37–53.
- Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T. et al.** Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska // Geophys. Res. Lett., 2009, vol. 36, No. 3, p. L03503.
- Tumskoy V., Kuznetsova T.** Cryolithostratigraphy of the Middle Pleistocene to Holocene deposits in the Dmitry Laptev strait, Northern Yakutia // Front. Earth Sci., 2022, vol. 12, No. 2, p. 324.
- URL:** <https://www.gebco.net> – General Bathymetry Charts of the Oceans (дата обращения: 20.03.2024).
- URL:** https://rp5.ru/Weather_archive_in_Marresale (дата обращения: 24.03.2024). RP5 – Расписание погоды. Архив метеоданных на ГМС Марресале.
- URL:** <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения: 04.03.2024).
- URL:** <https://worldview.earthdata.nasa.gov> – EOSDIS Worldview Version 4.37.0 (дата обращения: 24.03.2024).
- URL:** <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=2> (дата обращения: 24.03.2024). – ВНИГМИ–МЦД – Всемирный научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных.

References

- Aleksyutina D.M., Motenko R.G. The composition, structure and properties of frozen and thawed deposits on the Baydaratskaya Bay coast, Kara Sea. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 11–22.
- Buldovich S.N., Danilov I.D. Temperature field of the shallow marine deposits of the Arctic seas in the area of fast ice adfreezing to bottom sediments. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1998, vol. II, No. 1, p. 62–67.
- Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Streletskaia I.D., Fedin V.A., Shirokov R.S., Zadorozhnaia N.A. Thermal regime of the upper part of permafrost in the transition zone from land to sea, Western Yamal. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 4, p. 28–35.
- Vasiliev A.A., Streletskaia I.D., Shirokov R.S., Oblogov G.E. Coastal permafrost evolution of Western Yamal in context of climate change. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 2, p. 56–64.
- Vasiliev A.A., Shirokov R.S., Oblogov G.E., Streletskaia I.D. Dynamics of sub-aquatic permafrost of the Kara Sea in changing

- climatic conditions. In: Materials of the 5th conference of geocryologists of Russia (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, Univ. kniga, 2016, vol. 2, pt 5–7, p. 5–11. (in Russian).
- Grigoriev N.F. Permafrost zone of the coastal part of western Yamal. In: Proceedings of the Institute of Permafrost Science, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Yakutsk, 1987, 111 p (in Russian).
- Grigoriev M.N. Morphology and dynamics of transformation of underwater permafrost in the coastal-shelf zone of the Laptev and East Siberian seas. *Nauka i Obrazovanie* [Science and Education], 2006, No. 4, p. 104–109.
- 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.
- Dumanskaya I.O. *Ledovye usloviya morei evropeiskoi chasti Rossii* [Ice conditions of the seas of the European part of Russia]. Moscow; Obninsk, IG-SOTSIN, 2014, 608 p. (in Russian).
- Zhigarev L.A. *Okeanicheskaya kriolitizona* [Oceanic cryolithozone]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1997, 319 p. (in Russian).
- Zubov N.N. *O l'dakh Arktiki i Antarktiki* [About the ice of the Arctic and Antarctic]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1956, 118 p. (in Russian).
- Kotlyakov V.M., Velichko A.A., Glazovsky A.F., Tumskey V.E. Past and present of the Arctic cryosphere. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 85, No. 5/6, p. 463–471.
- Makarov K.N., Vyalyi E.A. Modeling of slope deformations of an artificial alluvial island. *Gidrotekhnika* [Hydrotechnics], 2020, No. 1 (58), p. 30–33.
- Motychko V.V., Opekunov A.Yu., Konstantinov V.M., Sokolov G.N. Morpholito genesis and composition of bottom sediments of Baydaratskaya Bay. *Vestnik SPbGU* [Bulletin of St. Petersburg State University], 2013, vol. 1, p. 65–77.
- Ogorodov S.A., Shabanova N.N., Kessel A.S., Baranskaya A.V., Razumov S.O. Changes in the hydrometeorological potential of thermal abrasion of the coasts of the seas of the Russian Arctic. *Vestnik NGU* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2022, No. 1, p. 26–42.
- Osnovy geokriologii [Fundamentals of geocryology. Part 5. Engineering geocryology]. E.D. Ershov (ed.). Moscow, Moscow Univ. Press, 1999, 526 p. (in Russian).
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V., Chernov R.A. Effective thermal conductivity of snow and its variations. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 55–61.
- Romanovskii N.N., Tumskey V.E. Retrospective approach to the estimation of the contemporary extension and structure of the shelf cryolithozone in East Arctic. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2011, vol. XV, No. 1, p. 3–14.
- Romanovskii N.N., Kholodov A.L., Gavrilov A.V., Tumskey V.E., Hubberten H.-W., Kassens H. Ice-bonded permafrost thickness in the eastern part of the Laptev Sea shelf (results of computer modeling). *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 2, p. 22–32.
- Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V., Eliseeva A.A., Tipenko G.S., Kholodov A.L., Romanovsky V.E. Permafrost and gas hydrate stability zone evolution on the eastern part of the Eurasia Arctic sea shelf in the Middle Pleistocene–Holocene. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2003, vol. VII, No. 4, p. 51–64.
- Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I. et al. Permafrost degradation and imbalance in the carbon cycle in the seas of the Eastern Arctic (greenhouse gas flows, extreme acidification, georisks). In: Comprehensive studies of the natural environment of the Arctic and Antarctic: Abstracts of the international scientific conference (St. Petersburg, March 2–4, 2020). St. Petersburg, Arctic and Antarctic Research Institute, 2020, p. 81–84 (in Russian).
- Sergienko V.I., Lobkovskii L.I., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of East Arctic seas as a potential cause of the methane catastrophe: some results of integrated studies in 2011. *Doklady RAN* [Doklady Earth Sciences], 2012, vol. 446, No. 1, p. 1132–1137.
- Solomatin S.V., Kozlov D.V. Taking into account the peculiarities of ice conditions to improve the environmental efficiency of hydraulic engineering projects on the Russian Arctic shelf. *Prirodoustroistvo* [Nature Engineering], 2021, No. 1, p. 37–53.
- Jones B.M., Arp C.D., Jorgenson M.T., Hinkel K.M., Schmutz J.A., Flint P.L. Increase in the rate and uniformity of coastline erosion in Arctic Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, vol. 36, No. 3, p. L03503. DOI: 10.1029/2008GL036205.
- Tumskey V., Kuznetsova T. Cryolithostratigraphy of the Middle Pleistocene to Holocene Deposits in the Dmitry Laptev Strait, Northern Yakutia. *Front. Earth Sci.*, 2022, vol. 12, No. 2, p. 324. – <https://doi.org/10.3389/feart.2022.789421>
- URL: <https://www.gebco.net/> – General Bathymetry Charts of the Oceans (last visited: 20.03.2024).
- URL: https://rp5.ru/Weather_archive_in_Marresale (last visited: 24.03.2024). RP5 – Weather schedule. Archive of weather data at HMS Marresale.
- URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (last visited: 04.03.2024).
- URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> – EOSDIS Worldview Version 4.37.0 (last visited: 24.03.2024).
- URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=2> (last visited: 24.03.2024). VNIGMI–WCD – World Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center.

*Поступила в редакцию 20 мая 2024 г.,
после доработки – 8 августа 2024 г.,
принята к публикации 27 декабря 2024 г.*