

А. В. Гаврилов¹, В. В. Малахова²

Разработка карты шельфовой криолитозоны с использованием численного моделирования: значимость геологических факторов

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: malaxv@list.ru

Аннотация. Создание карты субмаринной мерзлоты арктического шельфа с использованием численного моделирования представляет собой важную задачу для понимания состояния и динамики криогенных процессов в регионе. Рассматривается подход к составлению карты шельфовой мерзлоты, предусматривающий учет как климатической и гляциоэвстатической цикличности, так и вклада геологического развития арктического шельфа в формирование субаквальной мерзлоты. Результаты моделирования показывают, что геологические факторы играют важнейшую роль в формировании шельфовой криолитозоны. Так, для разнотипных тектонических структур различия в модельной мощности мерзлоты могут составить 230-300 м. Использование численного моделирования позволит не только получить схему распространения субаквальной мерзлоты, но и прогнозировать изменения в криолитозоне под воздействием различных факторов, таких как глобальное потепление и антропогенные воздействия.

Ключевые слова: криолитозона, субаквальная мерзлота, арктический шельф, численное моделирование

A. V. Gavrilov¹, V. V. Malakhova²

The importance of geological factors in creating a map of the shelf cryolithozone using numerical modeling

¹Lomonosov Moscow State University, M.V. Lomonosov, Moscow, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: malaxv@list.ru

Abstract. The creation of a submarine permafrost map of the Arctic shelf using numerical modeling is an important task for understanding the state and dynamics of cryogenic processes in the region. This study proposes a methodology for mapping the shelf permafrost that incorporates the dynamics of climatic and glacioeustatic cycles, whilst also accounting for the role of geological development in the Arctic shelf, contributing to the formation of submarine permafrost. The modeling results demonstrate that geological factors play a crucial role in the formation of the shelf cryolithozone. Consequently, the variations in model permafrost thickness can reach 230-300 m, depending on the distinct tectonic structures. The employment of numerical modeling will facilitate the acquisition of a scheme depicting the distribution of subsea permafrost, in addition to the prediction of alterations in the cryolithozone in response to various factors, including global warming and anthropogenic impacts.

Keywords: cryolithozone, submarine permafrost, Arctic shelf, numerical modeling

Введение

Многолетнемерзлые породы (ММП) формировались в условиях холодного климата и гляциоэвстатических циклов [1, 2]. Задачи по созданию карт криолитозоны Арктики становятся все более актуальными в свете активизации поисково-разведочных работ на углеводородное сырье и перспектив расширения транспортного использования региона. Основные задачи картирования: 1) оценка распространения многолетнемерзлых пород; 2) оценка глубины залегания нижней границы мерзлоты (подошвы); 3) оценка глубины залегания верхней границы мерзлоты (кровли); 4) оценка вертикального строения криолитозоны.

Наличие скважин позволяет получить представление о глубине залегания кровли мерзлоты на значительной части шельфа. Например, в проливе Дм. Лаптева глубина залегания кровли мерзлоты варьируется от 10 до 20 м, а на двух участках достигает 40 м [3]. В проливе Санникова ни одна из шести скважин, имеющих глубину до 70 м, не обнаружила мерзлых пород. Тем не менее, наличие посткриогенных текстур в отложениях указывает на их предшествующее существование.

По результатам сейсмического профилирования получены фактические данные о состоянии мерзлых пород на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского [4, 5]. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии или островном распространении мерзлоты в море Лаптевых, начиная с изобат 50-60 м. В Восточно-Сибирском море подобные признаки наблюдаются даже на меньших глубинах.

Недостаток геофизических данных на шельфе Арктики, а также отсутствие методик их интерпретации для геокриологических целей обуславливают необходимость решения указанных задач с использованием численного моделирования. Тепловое математическое моделирование позволяет учитывать различные факторы, влияющие на динамику криосферы, такие как изменение температуры воздуха, температуры и солености донных отложений, уровня моря, а также влияние антропогенных факторов. К настоящему времени на базе численного моделирования составлено и опубликовано несколько карт, картосхем и схем субмаринной криолитозоны Северного полушария или таких его крупных частей, как Восточно-Сибирский шельф [6-10]. Почти все они отражают только роль цикличности климата и батиметрии арктических шельфовых морей в ее формировании. Вклад геологических факторов, т.е. истории развития шельфа в среднем неоплейстоцене-голоцене, геологического строения литосферы мощностью порядка 5 км, остался неучтенным. Так в работах [11, 12] показано, что существование оледенения могло оказать существенное влияние на мощность мерзлого слоя острова Новая Сибирь и прилегающего шельфа. Наиболее значимо роль истории геологического развития отражена в работе [13]. В ней учтены гляциоизостатические движения, обязанные шельфовым и прибрежным плейстоценовым ледникам. Однако гляциоизостазией не исчерпывается воздействие геологических факторов, на формирование криолитозоны.

В работе представлены результаты численного моделирования шельфовой мерзлоты, демонстрирующие значение как климатической и гляциоэвстатической цикличности, так и вклада геологического развития арктического шельфа в формирование субаквальной мерзлоты.

Методы и материалы

Используется одномерная модель термофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлым и талым грунтом [2, 14].

Физические и теплофизические свойства пород, используемые при численном моделировании, зависят от глубины залегания и состава пород и задавались в соответствии с принятой геологической моделью. Мы предполагаем, что поры пород полностью заняты водой или льдом. Граничное условие на поверхности донных отложений определяется периодами трансгрессий-регрессий с учетом изменения уровня моря, а также существованием ледниковых условий за последние 200 тысяч лет.

Сценарий 1 составлен для сравнения результатов моделирования глубин залегания подошвы и кровли мерзлоты на шельфе морей Карского (С1-А) и Лаптевых (С1-Б). Вторая серия сценариев (С2-Б, С3-Б) предназначена для сравнения результатов моделирования для различных типов тектонических структур.

В качестве основы палеогеографического сценария для шельфа моря Лаптевых была принята палеотемпературная летопись Восточной Антарктиды. Для ледникового Баренцево-Карского шельфа учитывалось, что морские обстановки существовали во вторую половину казанцевского времени [15, 16].

Обсуждение результатов

В разделе представлены результаты численного моделирования по тестовым сценариям, которые позволяют учесть роль некоторых геологических факторов.

Моделирование осуществлено для наиболее изученного временного интервала: МИС-5е – голоцен. Его результаты в отношении Западного (Карского моря) и Восточного секторов Арктики (море Лаптевых) показывают важность вклада истории геологического развития в формирование шельфовой мерзлоты.

Так, на участках изобаты 5 м на Карском шельфе заглубление подошвы мерзлоты (200 м) по данным моделирования оказывается на 300 м меньше, чем в пределах моря Лаптевых, рис.1. Здесь его модельное значение составляет 511 м (табл.1). Величина заглубления хорошо соотносится с мощностью береговой мерзлоты по данным Геокриологической карты СССР масштаба 1:2 500 000 [17]. На Ямале и Гыдане она варьирует от 200 до 400, на Лено-Анабарском побережье - от 500 до 700 м [17]. Тогда как на модельной карте криолитозоны Северного полушария [6] в противоположность выявленным различиям подошва мерзлоты на мелководьях в восточной части морей Карского и Лаптевых приурочены к одинаковой поддонной глубине - 600-700 м.

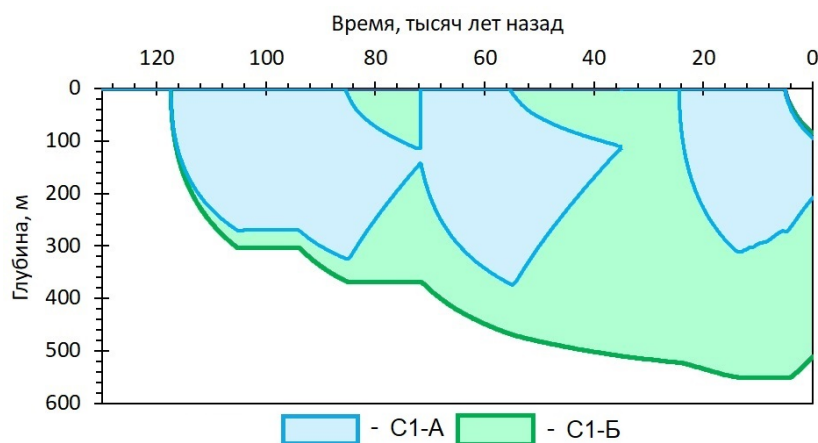


Рис. 1. Эволюция мощности мерзлых пород для северо-востока Карского (голубой контур) и Лаптевоморского (зеленый контур) шельфов. Район изобат 5 м

Глубины залегания кровли мерзлых пород по данным моделирования нарастает по мере увеличения глубин моря. На изобате 100 м на Карском шельфе ее модельные значения (107 м, табл.1) на 50 м больше, чем на море Лаптевых (52 м). Полученные значения соответствуют средним буровым данным в этих морях [3, 18].

Таблица 1

Результаты моделирования (П – подошва, К–кровля мерзлоты, м)

Сценарии	Результаты моделирования на участках изобат							
	5 м		40 м		70 м		100 м	
	П	К	П	К	П	К	П	К
С1-А	207.5	94.5	154.0	141.5	151.5	125.5	143.5	107.5
С1-Б	511.0	85.0	295.5	72.5	292.0	67.0	264.0	52.0
С2-Б	556.5	80.0	271.0	82.0	268.0	70.5	241.0	51.0
С3-Б	789.5	79.5	547.0	81.0	547.5	69.0	534.0	51.0

При оценке роли тектоники на глубину промерзания пород мощность осадочного чехла в поднятиях задавалась равной 500 и 300 м (С2-Б и С3-Б соответственно). Основным фактором предполагаемого более глубокого промерзания поднятий и щитов в сравнении с тектоническими опусканиями является повышенный коэффициент теплопроводности (λ) плотных древних пород фундамента. Моделирование показывает, что этот фактор при $\lambda = 3-3.5$ Вт/м·К «работает» только при небольшой мощности чехла (300 м, табл. 1). Глубина промерзания пород при указанных значениях λ на участках изобатах 5 м в опусканиях составляет 70 % от таковой в пределах поднятий. При уменьшении мощности чехла до 90 м мощность мерзлоты на поднятиях может в 2-2.5 раза превышать таковую в пределах опусканий [19].

Заключение

Результаты тестового моделирования показали:

1. Наиболее значимо на мощность мерзлоты (около 300 м, возможно более) влияет учет различий в истории геологического развития шельфов - Карского с одной стороны, и моря Лаптевых – с другой.

2. Превышение в мощности мерзлых толщ тектонических поднятий перед опусканиями в проведенном эксперименте оказалось более 200 м. Оно может увеличиться на участках неглубокого (100 м) залегания фундамента или его выхода на поверхность.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что геологические факторы играют важнейшую роль в формировании шельфовой криолитозоны. Их учет крайне необходим при составлении карт криолитозоны. Работа над созданием карт криолитозоны должна быть многопрофильной и включать сотрудничество между геологами, климатологами, геофизиками и специалистами в области численного моделирования. Такой комплексный подход позволит не только создать актуальные карты, но и разработать рекомендации для эффективного управления природными ресурсами региона, минимизируя негативное воздействие на экосистему Арктики. В конечном итоге, успешное осуществление данных задач будет способствовать более безопасной и устойчивой эксплуатации ресурсов и развитию транспортной инфраструктуры.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романовский Н. Н., Хуббертен Х. В., Гаврилов А. В., Елисеева А. А., Типенко Г. С., Холодов А. Л., Романовский В. Е. 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.
2. Malakhova, V. V., Eliseev, A. V. Subsea permafrost and associated methane hydrate stability zone: how long can they survive in the future? // Theor. Appl. Climatol. - 2024. - V. 155. - P. 3329–3346.
3. Фартышев А. И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. – Новосибирск: Наука, 1993. – 135 с.
4. 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. – V. 13. – № 4. – P. 501–515. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-501-515.
5. Богоявленский В. И., Кишанков В. И., Казанин А. Г. Мерзлота и газогидраты на арктическом шельфе Восточной Сибири // ДАН. Науки и Земле, 2022, т. 507, № 1, с. 110-117.
6. Overduin P. P., Schneider von Deimling, T., Miesner et al. Submarine Permafrost Map in the Arctic Modeled Using 1-D Transient Heat Flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research Oceans. – 2019. - V. 124 (1). DOI: 10.1029 / 2018JC014675
7. Malakhova V. V. Modeling of the Arctic subsea permafrost thawing under possible climate warming // Proc. SPIE, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 2023. – V. 12780. – P. 127804U. doi: 10.1117/12.2688510.

8. Кошурников А. В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований). Автореф. дисс. д.г.-м.н., М., 2023.
9. Смирнов Ю. Ю., Матвеева Т. В., Щур Н. А., Щур А. А., Бочкарев А. В. Численное моделирование субаквальных многолетнемерзлых пород на Евразийском шельфе Арктики с учетом зональности современного климата. // Криосфера Земли. 2024. – Т. XXVIII. – № 5. – С. 38-59.
10. Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M., Shakhova N., Spivak E., Dudarev O., Osadchiev A., Spasennykh M., Semiletov I. 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. . – V. 157. – 106467.
11. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Оценка мощности мерзлых толщ острова Новая Сибирь по данным геотермии и численного моделирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2023. – Т. 68. – № 3. DOI:10.21638/spbu07.2023.401
12. Gavrilov A., Malakhova V., Pizhankova E., Popova A. Permafrost and Gas Hydrate Stability Zone of the Glacial Part of the East-Siberian Shelf // Geosciences. 2020. – V. 10. – №12. – P. 484. DOI:10.3390/geosciences10120484
13. Creel Roges C., Mesner F., Wilkenskjeld S., Austermann J., Overduin P.P. Glacial isostatic adjustment reduces past and future Arctic subsea permafrost // Nature Communications. 2024. – V. 15. – № 3232. DOI:10.1038/s41467-024-45906-8
14. Malakhova V. V. Estimation of the subsea permafrost thickness in the Arctic Shelf // Proceedings SPIE: 24nd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 2018. – V. 10833. – P. 108337T.
15. Гусев Е. А., Молодьков А. Н., Стрелецкая И. Д. и др. Отложения казанцевской трансгрессии (МИС-5) Енисейского Севера // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 743–757.
16. Гаврилов А. В. Типизация арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли. – 2008. – Т. XII. – № 3. – С. 69-79.
17. Геокриологическая карта СССР, м-б 1:2 500 000 / Ред. Э.Д. Ершов. М.: МГУ, геологический ф-т, 1991.
18. Куликов С. Н., Рокос С. И. Выделение массивов многолетнемерзлых пород на временных сейсмоакустических разрезах мелководных районов Печорского и Карского морей // Геофизические изыскания. – 2017. – № 3. – С. 34–42.
19. Гаврилов А. В., Малахова В. В., Деревягин А. Ю., Пижанкова Е. И., Попова А. А. Мерзлые породы Восточно-Сибирского шельфа и их связь с логическими событиями среднего неоплейстоцена-голоцена // Геология морей и океанов, Т. IV. М. – 2021. – С. 36-40.

© А. В. Гаврилов, В. В. Малахова, 2025