



КРИОГЕННОЕ СТРОЕНИЕ ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТОВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ПРИМОРСКИХ РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛЕВЫХ РАБОТ 2025 ГОДА

✉ Самохвалов Н.Д.^{1,2}, Маслаков А.А.^{1,2}, Лупачев А.В.¹, Гинзбург А.П.¹

¹ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ samohvalov.nd@ya.ru

В работе представлены результаты полевых исследований параметров мерзлой части почвенно-мерзлотных комплексов приморских равнин Восточной Чукотки. Промежуточный слой многолетнемерзлых пород подстилает сезонно-талый слой и характеризуется повышенным содержанием льда, что определяет его барьерную роль в условиях короткопериодных колебаний температуры воздуха. В пределах ключевого полигона было выполнено изучение рельефа и четвертичных отложений, выполнены буровые работы. В результате исследований были определены мощности промежуточного слоя в пределах разных геоморфологических уровней, а также его криогенное строение.

Ключевые слова: Многолетнемерзлые породы, почвенно-мерзлотный комплекс, криогенное строение, промежуточный слой, Чукотка

Введение. Отклик мерзлой толщи на климатические изменения заметно отличается в разных регионах криолитозоны [Maslakov et al., 2019; Abramov et al., 2021]. В настоящее время реакция многолетнемерзлых пород (ММП) на потепление климата в Арктике выражается в увеличении глубины сезонного протаивания, увеличении температур ММП [Biskaborn et al., 2019] и активации опасных криогенных процессов.

Ускоряющиеся темпы сезонного протаивания приводят к осадке дневной поверхности, и это явление широко распространено в криолитозоне [Streletskiy et al. 2025]. Сумма сезонной осадки пород и мощности сезонноталого слоя (СТС) более репрезентативна для характеристики темпов деградации мерзлоты, чем просто измерения глубин протаивания. Наиболее важным фактором, определяющим величины вертикальных деформаций поверхности в результате осадки и печения, является криогенное строение верхних горизонтов ММП [Маслаков и др., 2025]. Они имеют специфическое криогенное строение, в котором могут выделяться переходный и промежуточный слои (ПС, ПрС) [Шур, 1988].

ПС и ПрС ММП имеют ключевое значение для множества процессов, протекающих в верхних горизонтах мерзлой толщи [Лупачёв, Губин, 2008; Романовский, 1993; Shur et al., 2005]. Вместе с СТС они формируют своеобразную буферную систему, обеспечивающую устойчивость ММП в широком диапазоне условий. По этой причине некоторые исследователи называют его защитным слоем [Конищев, 2009]. ПС и ПрС характеризуются повышенным содержанием льда. Благодаря этому они сдерживают протаивание верхних горизонтов ММП и поддерживают их термическую стабильность [Shur et al., 2005].

Цель исследования – установить характерные черты криогенного строения ПрС и его распространения в разных мерзлотно-ландшафтных условиях полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки». Основой исследования являются данные бурения неглубоких скважин в августе 2025 г., а также результаты полевых ландшафтных описаний.

Район исследования. Ключевой полигон исследований (рис. 1) имеет площадь 440 км². Он расположен на приморских равнинах восточной части Чукотского полуострова и примыкающих к ним предгорьях и склонах хребта Гэнканый (Тенианый). Равнина представляет собой пологонаклонные поверхности террас различной высоты, возраста и

генезиса. В восточной части полигона, на южном берегу залива Лаврентия располагается IV озёрно-ледниковая терраса, сложенная валунными суглинками нижнего Плейстоцена (QI 2) (Оляйонская свита) и достигающая высоты 60-80 м н.у.м. Поверхность террасы увалистая, слабонаклонная. Отложения представлены суглинком серого и сизого цвета, с включением несортированных слабоокатанных обломков диаметром до 2 метров, в морских отложениях встречаются линзы песков с включениями гальки. Валунные суглинки фрагментарно перекрыты голоценовыми торфяниками, вмещающими повторно-жильные льды [Vasil'chuk et al., 2018].

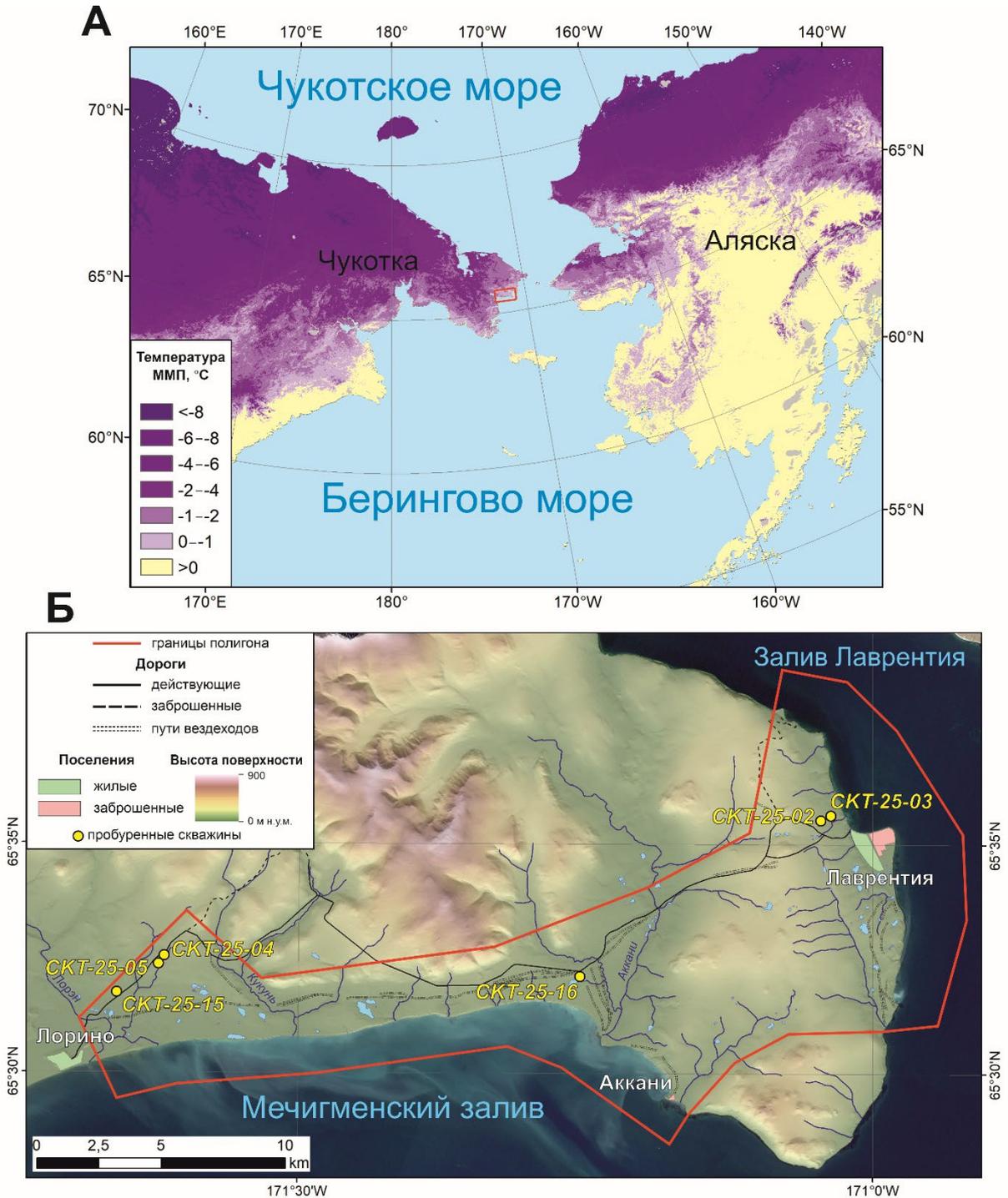


Рис. 1. Расположение района исследования (А) и пробуренных скважин на территории полигона «Приморские равнины Восточной Чукотки» (Б)

Центральная и западная части полигона представлены IV морской и ледниково-морской террасой (QII 2-4) высотой 40-80 м н.у.м., сложенной Оляйонскими суглинками серыми с включением валунов и разнозернистыми песками серыми, жёлтыми и палевыми с включением гальки (вероятно, Мечигменской свиты). Поверхность террасы ровная, имеет слабый уклон в сторону моря, на побережье осложнена оврагами и балками. III морская терраса (QIII 1) имеет абсолютные высоты 15-30 м, сложена песками с включениями гальки Мечигменской и Крестовской свит. В пределах полигона терраса встречается в восточной части, она также формирует эрозионные останцы в долине р. Лоринки. В восточной части полигон представлен долинным комплексом р. Лоринки (рис. 1). Надпойменная терраса р. Лоринки имеет высоту 10-15 м и сложена песками, супесями и суглинками голоценового возраста. Пойма реки, как и других рек в пределах полигона, узкая, сложена суглинками и супесями, русла выстланы аллювием из гальки и окатанных валунов. Для территории Восточной Чукотки характерно сочетание арктического и субарктического климата, что вызвано значительным влиянием морских воздушных масс Тихого океана. Лето пасмурное и прохладное, зима длительная, с частыми и затяжными метелями. Среднегодовое количество осадков на востоке Чукотки растёт с севера на юг от 230 (Уэлен) до 690 мм (Провидения) [Кобышева, 2001].

ММП в районе исследования имеют сплошное распространение, Несквозные талики (мощностью до 40 м) встречаются только в нижнем течении крупных рек и под самыми крупными термокарстовыми озёрами. Температура мёрзлых пород составляет в среднем – 10°C в осевых частях горных хребтов и –2..–4°C в долинах рек и на побережье. Мощность мерзлых толщ меняется от 500–700 м в самых высоких частях хребтов до 200–300 м на побережье. Сезонное оттаивание пород относится к длительно-устойчивому и устойчивому типу по температуре, и к умеренно-континентальному типу по амплитуде температур на поверхности [Геокриология СССР, 1989].

Наиболее распространённые криогенные формы рельефа – термокарстовые западины (тяготеют к IV морской и ледниково-морской террасе и ледниковой равнине), морозобойные полигоны (преимущественно на торфяниках), формы комплексной деструкции (термоцирки и термокары), термоэрозионные овраги. Термоабразивные процессы характерны для морских террас, в меньшей степени для голоценовых кос. Для водно-ледниковой равнины более характерны процессы береговой термоденудации. Пучение преимущественно сезонное [Маслаков и др., 2018].

Материалы и методы. Исследование четвертичных отложений в пределах полигона производилось путём анализа литературных источников [Гасанов, 1969; Иванов, 1986], Изученные материалы сопоставлялись с результатами маршрутных наблюдений и бурения неглубоких скважин. Бурение СТС и верхних горизонтов ММП (до 2 м) проводилось на ряде геоморфологических поверхностей (табл.1) при помощи мотобура ADA GroundDrill 15 с использованием буровых ложек и колонковых труб. Извлечённый керн описывался, проводилась визуальная оценка льдистости [по Жестковой и др., 1980], также отбирались образцы для лабораторных исследований керна.

Результаты. В результате проведенных исследований, по данным скважин, характеризующих разные геоморфологические уровни приморских равнин Восточной Чукотки, было установлено неоднородное криогенное строение верхних горизонтов ММП. Несмотря на сходные условия рамках одних геоморфологических уровней, ПрС залегает весьма неравномерно, что в целом можно объяснить палеогеографическими условиями формирования верхних горизонтов ММП в голоцене.

Так, наибольшая мощность промежуточного слоя, составляющая около 120 см, была установлена в скважине СКТ-25-02 на IV озерно-ледниковой террасе (рис.1). Сочетание валунных суглинков со слабонаклонной поверхностью, создавали благоприятные условия для формирования атакситовой криогенной текстуры, маркирующей ПрС (табл. 1). Однако, несмотря на сходный состав отложений, в скважине СКТ-25-03 ПрС не был вскрыт. Данное явление обусловлено сочетанием двух факторов: пологонаклонной

поверхностью и значительным объёмом валунного материала вблизи поверхности. Эти факторы воздействуют на поверхностный сток, который регулирует влажностный режим пород и в итоге формирует криогенное строение верхних горизонтов ММП.

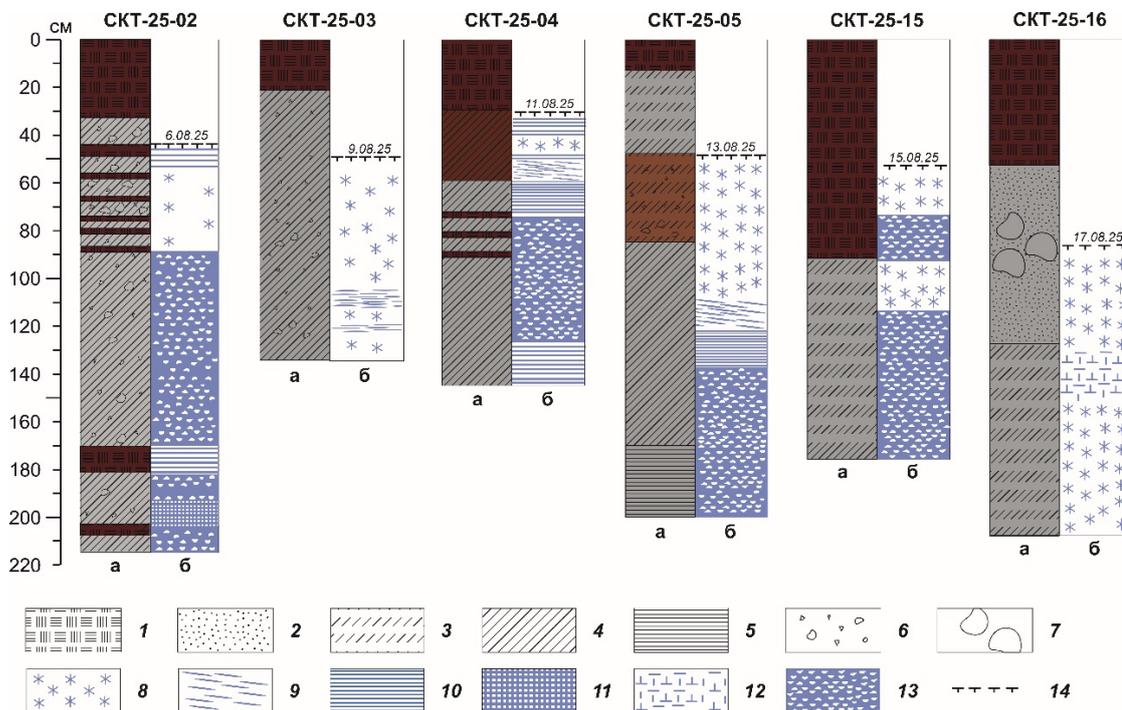


Рис. 2. Литологическое (а) и криогенное (б) строение верхних горизонтов ММП на приморских низменностях Восточной Чукотки: 1 – торф, 2 – песок, 3 – супесь, 4 – суглинок, 5 – глина, 6 – дресва, 7 – валуны, 8 – массивна криогенная текстура, 9 – линзовидная криогенная текстура, 10 – слоистая криогенная текстура, 11 – сетчатая криогенная текстура, 12 – неполносетчатая криогенная текстура, 13 – атакситовая (базальная) криогенная текстура, 14 – глубина сезонного протаивания на момент бурения.

Также характерный разрез верхних горизонтов ММП, содержащих ПрС, был описан в скважинах SKT-25-04, SKT-25-05 и SKT-25-15. Супесчаный состав отложений в сочетании с мощным (40-80 см) торфяным покровом создают условия для консервации высокольдистого горизонта в современных климатических условиях. Помимо этого, в скважинах SKT-25-02 и SKT-25-04 характерной чертой верхних горизонтов ММП может быть обозначен ПС, характеризующийся в изученных скважинах повышенной льдистостью, непосредственно под слоем сезонного протаивания и отделенный от ПрС менее льдистым прослоем. В скважине SKT-25-16 ПрС слабо выражен, несмотря на песчаный состав отложений, не способствующий аккумуляции влаги и формированию высокольдистых отложений, которые маркируются неполносетчатой криогенной текстурой в изученной скважине.

Выводы. Проведенные исследования позволяют судить о пространственной неоднородности криогенного строения верхних горизонтов ММП и распространении ПС и ПрС ММП. В условиях приморских равнин Восточной Чукотки прослеживается связь между геоморфологическими уровнями и составом отложений, а также условиями поверхностного стока. В настоящее время выделение и характеристика как латерального распространения ПС и ПрС, так и в разрезе, является не до конца решенной задачей ввиду небольшого набора диагностических признаков (прежде всего криолитологических) и высокой изменчивости глубин сезонного протаивания, вследствие которых ПС и ПрС могут полностью деградировать.

Табл. 1. Сравнительная характеристика основных точек исследования.

Скважина	Позиция в рельефе	Состав пород	Тип растительного покрова	Криогенное строение	Мощность ПрС
СКТ-25-02	IV озерно-ледниковая терраса	Суглинок оторфованный с валунами	Плоско-бугорковатая ивово-осоковая тундра с фрагментами зеленого мха, шикши и лишайников	Неполносетчатая, атакситовая	120 см
СКТ-25-03				Массивная, линзовидная	-
СКТ-25-04	III ледниково-морской террасы	Супесь с включениями дресвы	Пятнисто-медальонная тундра с зелеными мхами, морошкой, багульником, брусничкой, карликовой березкой, редкой ивой	Слоистая, атакситовая	50 см
СКТ-25-05	III морская терраса	Суглинок с включениями дресвы	Осоково-ивово-моховая тундра с березкой карликовой	Линзовидная, атакситовая	50 см
СКТ-25-15	III морская терраса	Супесь оторфованная	Плоско-бугристая тундра с торфяными и торфяно-минеральными микроповышениями	Слоистая, атакситовая	75 см
СКТ-25-16	IV морская терраса	Пески и супеси	Зеленомошно-ивковая тундра с разнотравьем	Массивная, неполносетчатая	-

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 25-17-00010.

ЛИТЕРАТУРА

- Гасанов Ш.Ш. Строение и история формирования мерзлых пород восточной Чукотки. М.: Наука, 1969. 167 с.
- Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток/ Редкол.: Э.Д. Ершов (гл. редактор) и др.; Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 515 с.
- Жесткова Т.Н., Заболотская М.И., Рогов В.В. Криогенное строение мерзлых пород. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. 137 с.
- Иванов В.Ф. Четвертичные отложения побережья Восточной Чукотки. - Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 140 с.
- Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. №. 4. С. 10-20.
- Лупачев А.В., Губин С.В. Участие почвообразования в формировании и организации переходного слоя многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. №. 2. С. 75-83.
- Маслаков А.А., Белова Н.Г., Баранская А.В., Романенко Ф.А. Пластовые льды на восточном побережье Чукотского полуострова при потеплении климата: некоторые итоги экспедиций 2014-2018 гг. // Арктика и Антарктика. 2018. №4. С. 30-43. doi:10.7256/2453-8922.2018.4.28528

Маслаков А.А., Стрелецкий Д.А., Замолодчиков Д.Г. Многолетний мониторинг осадки почв и верхней толщи многолетнемерзлых пород на площадке научного полигона “Приморские равнины Восточной Чукотки” // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX. № 5. С. 3–19. doi:10.15372/KZ20250501

Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: изд-во МГУ. 1993. 336 с.

Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мёрзлых пород и термокарст. Новосибирск, 1988. 213 с.

Abramov A., Davydov S., Ivashchenko A., Karelin D., Kholodov A., Kraev G., Shmelev D. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 186-202. doi:10.1080/1088937X.2019.1648581

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Allard M. Permafrost is warming at global scale // Nature communications. 2019. Vol. 10, 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Volobuev V., Kraev G. Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models // Geosciences. 2019. Vol. 9. Is. 5. № 232. doi:10.3390/geosciences9050232

Shur Y., Hinkel K. M., Nelson F. E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost and Periglacial Processes. 2005. Vol. 16. №. 1. P. 5-17. doi:10.1002/ppp.518

Streletskiy D.A., Maslakov A.A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu L., Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V., Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. Is. 1, 013006. doi:10.1088/1748-9326/ada2ff

Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L.M., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N. Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East Chukotka Peninsula // Permafrost and Periglacial Processes. 2018. Vol. 29. Is. 4. P. 283-297. doi:10.1002/ppp.1991

CRYOGENIC STRUCTURE OF UPPER PERMAFROST HORIZONS IN THE COASTAL PLAINS OF EASTERN CHUKOTKA

Samokhvalov N.D.^{1,2}, Maslakov A.A.^{1,2}, Lupachev A.V.², Ginzburg A.P.²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute of Physico-Chemical and Biological Problems in Soil Science RAS, Pushchino, Russia

This paper presents the results of a field study of the parameters of the intermediate permafrost layer in the coastal plains of Eastern Chukotka. The intermediate layer underlies the seasonally thawed layer and is characterized by a high ice content, which determines its barrier role in conditions of short-term air temperature fluctuations. Within the key testing area, the topography and Quaternary sediments were studied, and drilling operations were performed. The study determined the thickness of the intermediate layer within different geomorphic levels, as well as its cryogenic structure.

Keywords: *permafrost, soil-cryogenic complex, cryogenic structure, intermediate layer, Chukotka*

REFERENCES:

Abramov A., Davydov S., Ivashchenko A., Karelin D., Kholodov A., Kraev G., Shmelev D. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 186-202. doi:10.1080/1088937X.2019.1648581

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Allard M. Permafrost is warming at global scale // Nature communications. 2019. Vol. 10, 264. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Gasarov Sh. Structure and Formation History of Permafrost in Eastern Chukotka. Moscow: Nauka, 1969. 167 p. (in Russian).

Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East / Editorial Board: E.D. Ershov (Editor-in-Chief) et al.; Ed. by E.D. Ershov. Moscow: Nedra, 1989. 515 p. (in Russian).

Zhestkova T.N., Zabolotskaya M.I., Rogov V.V. Cryogenic Structure of Permafrost. - Moscow: Moscow University Press, 1980. 137 p. (in Russian).

Ivanov V.F. Quaternary Deposits of the Eastern Chukotka Coast. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center, USSR Academy of Sciences, 1986. 140 p. (in Russian).

Konishchev V.N. Permafrost Response to Climate Warming // Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. 2009. No. 4. P. 10-20. (in Russian).

Lupachev A.V., Gubin S.V. Role of Soil Formation in the Formation and Organization of the Permafrost Transient Layer // Earth's Cryosphere. 2008. Vol. 12. No. 2. pp. 75-83. (in Russian).

Maslakov A.A., Belova N.G., Baranskaya A.V., Romanenko F.A. Massive ice on the eastern coast of the Chukotka Peninsula during climate warming: some results of the 2014-2018 expeditions // Arctic and Antarctic. 2018. No. 4. pp. 30-43. doi:10.7256/2453-8922.2018.4.28528

Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Volobuev V., Kraev G. Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models // Geosciences. 2019. Vol. 9. Is. 5. № 232. doi:10.3390/geosciences9050232

Maslakov A.A., Streletsky D.A., Zamolodchikov D.G. Long-term monitoring of soil subsidence and the upper layer of permafrost at the Primorsky Plains of Eastern Chukotka research site // Earth's Cryosphere, 2025, Vol. XXIX, No. 5, pp. 3-19. <https://doi.org/10.15372/KZ20250501>

Romanovskii N.N. Fundamentals of Cryogenesis of Lithosphere. Moscow University Press, Moscow. 1993. 336 pp. (in Russian).

Shur Y.L., Upper Horizon of the Permafrost Soils and Thermokarst. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk. 1988. 213 p. (in Russian).

Shur Y., Hinkel K. M., Nelson F. E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // Permafrost and Periglacial Processes. 2005. Vol. 16. №. 1. P. 5-17. doi:10.1002/ppp.518

Streletskiy D.A., Maslakov A.A., Grosse G., Shiklomanov N.I., Farquharson L., Zwieback S., Iwahana G., Bartsch A., Liu L., Strozzi T., Lee H., Debolskiy M.V., Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // Environmental Research Letters. 2025. Vol. 20. Is. 1, 013006. doi:10.1088/1748-9326/ada2ff

Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L.M., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N. Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East Chukotka Peninsula // Permafrost and Periglacial Processes. 2018. Vol. 29. Is. 4. P. 283-297. doi:10.1002/ppp.1991