

СЕКЦИЯ СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

doi: 10.24412/2687-1092-2025-12-234-241



ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ОТТАИВАНИЯ ПОРОД ВЕРХНЕКОЛЫМСКОГО НАГОРЬЯ

✉ Абрамов Д.А.^{1,2}, Михайлова А.А.², Макарьева О.М.³, Жунусова О.Р.³, Никитина П.А.³,
Землянскова А.А.³, Нестерова Н.В.³

¹Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия;

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

³ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

✉ *omakarieva@yandex.ru*

В работе рассматривается пространственно-временное изменение глубины сезонного оттаивания пород на территории Верхнеколымского нагорья, а также ее зависимость от климатических и ландшафтных факторов. В связи с деградацией мерзлых пород вследствие изменения климата данная тема является важной не только с научной, но и с практической точки зрения. Глубина сезонного оттаивания пород влияет на выбор метода строительства при проектировании инженерных сооружений в криолитозоне, и ее изменение может негативно повлиять на их эксплуатацию. Работа основана на фактическом материале, полученном в результате комплексных геокриологических исследований 2022–2025 гг. Полевые работы включали в себя наблюдения на двух площадках комплексного стационара «Анмангындинская наледь» по методике программы CALM, микрорайонирование площадок по условиям теплообмена поверхности с отложениями. Полевыми и лабораторными методами определены физические свойства пород. Выявлены различия в режиме сезонного оттаивания на двух схожих по ландшафту площадках, расположенных на расстоянии 20 км друг от друга, связанные с высокой изменчивостью климатических характеристик в горном регионе. На глубину сезонного оттаивания пород оказывает влияние мощность торфа: при значениях менее 20 см глубина оттаивания может достигнуть 60 см, при увеличении – она снижается до 30–40 см. Получены региональные формулы, позволяющие определить глубину сезонного оттаивания в зависимости от суммы положительных градусочасов. Для слабо изученной территории Верхнеколымского нагорья такие результаты позволяют лучше понять закономерности пространственно-временного изменения сезонного оттаивания пород.

Ключевые слова: *сезонно-тальй слой, сезонное оттаивание, многолетнемерзлые породы, стационар «Анмангындинская наледь», Магаданская область, CALM, геокриологический мониторинг, ландшафт, климат*

В связи с развитием инфраструктуры в криолитозоне и современным изменением климата актуальной задачей становится мониторинг многолетнемерзлых пород (ММП) и геокриологических процессов. Отмечается недостаток знаний о трансформации толщ ММП под воздействием естественных и антропогенных изменений природно-климатических условий, которая может приводить к увеличению экологического и экономического ущерба [Порфириев и др., 2019; Hjort et al., 2022].

Для оценки реакции многолетнемерзлых пород на изменение климатических условий в 90-х годах прошлого века мировым научным сообществом была предложена идея циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM). В различных регионах мира предполагалась установка площадок наблюдения за глубиной сезонного оттаивания [Brown et al., 2000]. За прошедшие годы методика подвергалась критике со стороны многих исследователей, однако простота проведения измерений и получаемый результат показали свою эффективность в условиях отсутствия наблюдательных скважин.

В Магаданской области, где многолетнемерзлые породы занимают 99% территории, такие наблюдения до 2022 г. не проводились. Информация о глубине

сезонного оттаивания на площадках CALM совместно с данными термометрических скважин позволяет выявить изменение геокриологических условий различных ландшафтов региона и стать основой для геокриологического прогноза. Так, на территории Магаданской области авторами создана и расширяется сеть наблюдения за многолетнемерзлыми породами [Макарьева и др., 2024; Makarieva et al., 2024]. Также на комплексном стационаре «Анмангындинская наледь» были оборудованы 2 площадки для наблюдения за глубиной сезонного оттаивания по стандартам CALM: одна – в августе 2022 года в бассейне р. Анмангында [Makarieva et al., 2024], вторая – в сентябре 2023 года вблизи поселка Усть-Омчуг.

Целью исследования является определение факторов, влияющих на пространственно-временное изменение глубины сезонного оттаивания пород в пределах Верхнеколымского нагорья по данным наблюдений на CALM-площадках.

Верхнеколымское нагорье расположено на Северо-Востоке Российской Федерации и характеризуется различными ландшафтными, орографическими, климатическими, а потому и геокриологическими условиями. Рельеф территории – среднегорный, сильно расчлененный. Абсолютные высоты колеблются в пределах 550–2100 м. Климат резко континентальный, среднегодовая температура воздуха с 70-х годов прошлого века повысилась с -10.5°C (1966–1990) до -9.3°C (1991–2024) по данным метеостанции Усть-Омчуг. Территория относится к зоне сплошного распространения мерзлых пород, мощность которых достигает 100–200 м в долинах и 300–500 м на вершинах гор. Глубина сезонного оттаивания в регионе варьируется от 0.1 до 4.5 м [Замолотчикова, Зуев, 1989]. Состав и влажность пород оказывают сильное влияние на глубину оттаивания, минимальные значения характерны для торфов (0.1–0.8 м).

Площадка «Наледь» оборудована в бассейне р. Анмангында в делювиально-солифлюкционных отложениях на слабонаклонной ($5\text{--}6^{\circ}$) слабодренированной поверхности, ориентированной на северо-восток, на высоте 775–785 м. Напочвенный покров представлен мхом-сфагнумом. Микрорельеф относится к бугристо-западинному. Площадка «Усть-Омчуг» оборудована в надпойменной террасе р. Детрин, в 20 м от Тенькинской трассы, на высоте 580 м, расстояние от площадки «Наледь» 20 км. Слой торфа мощностью до 0.6 м перекрывает аллювиальные отложения. Напочвенный покров повсеместно представлен сфагновыми мхами. На территории всей площадки растет лиственничный лес различной степени сомкнутости крон.

Площадка CALM представляет собой участок 100×100 м, сетка с шагом 10 м. В 121 точке проводятся трехкратные измерения глубины сезонного оттаивания мерзлотным щупом преимущественно в июне и сентябре, а также высота снега в марте – апреле. По характерному глухому стуку устанавливается глубина сезонного оттаивания горных пород (ζотт), точность измерений составляет 1 см. Для обнаружения пикета используется высокоточное GNSS оборудование. Вблизи площадок установлены фотоловушки и рейки для наблюдения за динамикой высоты снежного покрова.

На основании маршрутных исследований и дешифрирования материалов аэрофотосъемки при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА) было проведено микрорайонирование площадок по характеру теплообмена отложений с поверхностью [Сергеев и др., 2016].

Вблизи площадки CALM «Наледь» в 2024 г. были сделаны 6 закопушек, вскрывающих кровлю мерзлоты. В каждой проведены замеры теплопроводности талого и мёрзлого слоёв с помощью теплофизического зонда МИТ-1 [Методы..., 2004]. Также в ходе проведения работ были отобраны образцы для определения естественной влажности, плотности сложения, температуры начала замерзания, относительного содержания органического вещества, зольности и засоленности исследуемых отложений. Температура начала замерзания (tbf) определялась криоскопическим методом [Методы..., 2004].

Для оценки влияния климатических факторов на глубину сезонного оттаивания использовался индекс оттаивания, представляющий собой корень из суммы

положительных градусочасов с начала тёплого периода времени к моменту измерений (\sqrt{DDT}) [Nelson *et al.*, 1997]. За начало тёплого периода принималась дата со среднесуточной температурой воздуха выше нуля градусов по материалам метеорологической станции Сокол М-1, установленной в долине р. Анмангында на высоте 721 м. Также для анализа климатических условий использовались данные метеорологической станции Усть-Омчуг (575 м).

Всего с момента оборудования площадки CALM «Усть-Омчуг» было проведено 3 замера мощности сезонно-талого слоя (СТС) и 1 снегомерная съемка, на площадке CALM «Наледь» – 10 замеров СТС и 3 снегомерных съемки.

Физические характеристики отложений на площадке CALM «Наледь» и их роль в формировании глубины сезонного оттаивания. Для площадки «Наледь» определены физические характеристики отложений (табл. 1). Выделено два основных типа пород – торф и суглинок. Температура начала замерзания у отложений отличается незначительно: у суглинка $t_{bf} = -0.1$ °C, торфа = -0.14 °C. Принципиальная разница коэффициента теплопроводности суглинка и торфа приводит к увеличению глубины сезонного оттаивания в местах, лишенных торфяной подушки. При малой мощности торфа (менее 20 см) глубина сезонного оттаивания составляет порядка 60 см, тогда как при увеличении его мощности глубина оттаивания сокращается до 30–40 см. Таким образом, сетка наблюдений через каждые 10 м не может показать все многообразие микроландшафтов [Сергеев *и др.*, 2016].

Табл. 1. Физические характеристики отложений площадки CALM «Наледь»

Тип породы	λ , Вт/м×К	We, %	ρ , г/см ³	t_{bf} , °C	ξ_{ott} , см
Торф	0.55–0.62	149.5–353.7	0.91–1.08	-0.09 – -0.15	30–40
Суглинок	0.82 – 1.02	41.1–64.2	1.70–1.88	-0.08 – -0.12	65

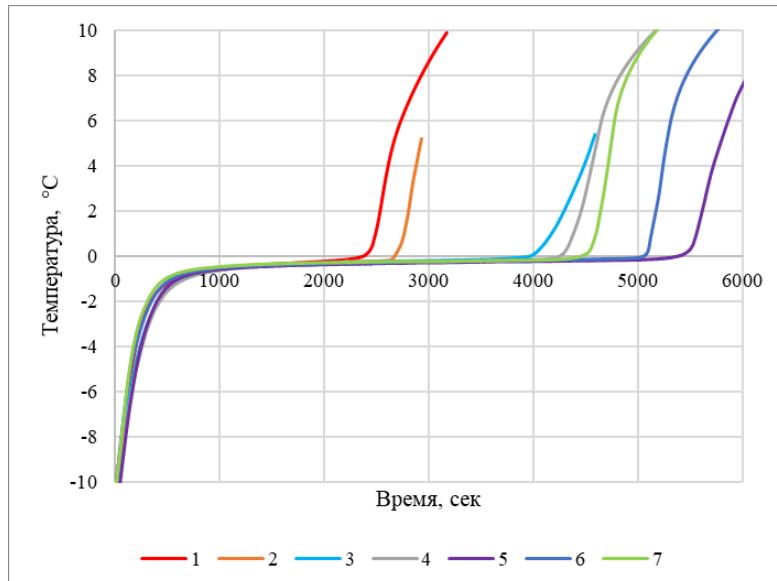


Рис. 1. Термограммы оттаивания грунтов при естественных значениях влажности:
1 – суглинок тяжёлый ($W = 41\%$); 2 – суглинок средний ($W = 57\%$); 3 – торф-1 ($W = 150\%$); 4 – торф-2 ($W = 161\%$); 5 – торф-4 ($W = 222\%$); 6 – торф-5 ($W = 336\%$); 7 – торф-6 ($W = 354\%$)

На рис. 1 представлены термограммы оттаивания грунтов при их естественных значениях влажности. По термограммам видно, что t_{ott} ниже и длительность оттаивания меньше у суглинков. Длительность оттаивания и t_{ott} для торфов зависит от состава и

содержания незамёрзшей воды, которая в свою очередь зависит от степени разложения и количества органического вещества.

Для некоторых торфов был определен химический анализ водной вытяжки (табл. 2). По полученным данным, торф-1 по степени засолённости – среднезасолённый, торф-2 – сильнозасолённый, торф-5 – слабозасолённый, тип засоления – хлоридный. Также для торфов была определена зольность и относительное содержание органического вещества.

Табл. 2. Химический анализ водной вытяжки торфов (по ГОСТ 59540-2021)

		торф-1	торф-2	торф-5
	pH	6.18	6.21	6.83
Катионы	Na^++K^+	186.8	512.5	55.3
	Mg^{2+}	0.0	2.5	0.0
	Ca^{2+}	1.9	4.2	0.6
	Сумма Кт	188.7	519.2	55.9
Анионы	Cl^-	205.7	620.4	56.7
	SO_4^{2-}	0.0	0.0	0,0
	HCO_3^-	147.5	317.8	59.9
	Сумма An	353.2	938.2	116.6
Засоленность (D_{sal}), %	2.26	6.64	0.64	
Концентрация порового раствора (C_{ps}), д. е.	0.015	0.038	0.002	

Также рассмотрим влияние температуры на содержания незамёрзшей воды в суглинках и торфах (рис. 2).

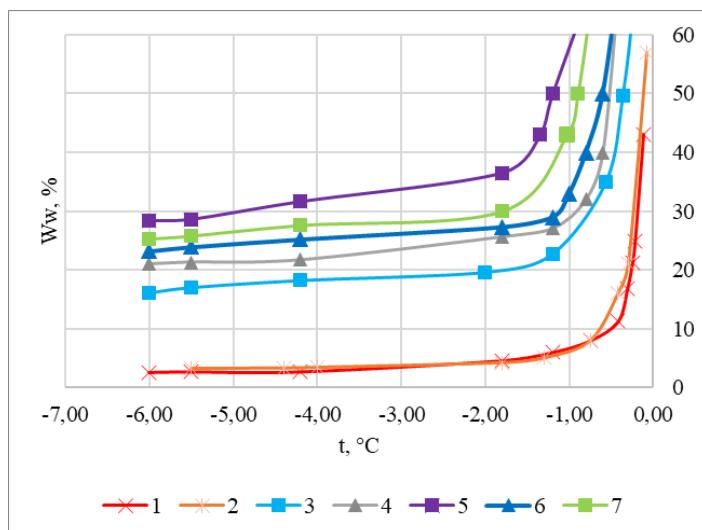


Рис. 2. Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры.

1 – суглинок тяжёлый; 2 – суглинок средний; 3 – торф-1; 4 – торф-2; 5 – торф-4; 6 – торф-5; 7 – торф-6

По графикам видно, что значения средних и тяжёлых суглинков практически совпадают. Хотя менее дисперсные породы должны иметь меньшее количество незамёрзшей воды, чем более дисперсные при одной температуре. Предположительно, это может быть связано с разным минеральным составом исследованных суглинков.

У торфов количество незамёрзшей воды больше, чем в суглинках при одинаковой температуре, что связано с дисперсностью и увеличением удельной поверхности. Наименьшие значения незамёрзшей воды у сильноразложившихся торфов (1 и 2), при этом содержание незамёрзшей воды у торфа-2 больше, чем у торфа-1, что можно

объяснить большей степенью засоления торфа-2. У среднеразложившихся торфов (4, 5, и 6) содержание незамёрзшей воды больше, чем у сильноразложившихся, а также увеличивается от торфа-5 до торфа-4 в соответствии с увеличением количества органического вещества.

Для всех торфов содержание незамёрзшей воды увеличивается с ростом количества органического вещества. У торфа-1 и торфа-2 с I_r равной 95.8 и 95.9%, соответственно, содержание незамёрзшей воды при $t = -6$ °C отличается на 4%, что связано с сильным засолением торфа-2.

Микрорайонирование площадок по условиям теплообмена с поверхностью. Дешифрирование снимков БПЛА позволило провести районирование площадок. На площадке «Наледь» было выделено 3 микрорайона: 1) Лиственничный лес с мохово-лишайниковым покровом; 2) Ложбина стока; 3) Лиственничный лес на лишайниковом горном склоне. На площадке CALM «Усть-Омчуг» также выражены 3 микрорайона: 1) Лиственничный лес с мохово-лишайниковым покровом; 2) Сфагновая марь с лиственничным редколесьем; 3) Техногенный участок.

Влияние ландшафтных и климатических характеристик на глубину сезонного оттаивания. Средняя глубина сезонного оттаивания на площадке «Усть-Омчуг» в конце летнего сезона за 2023 и 2024 гг. составила соответственно 43 и 42 см. Минимальная глубина оттаивания (32 см) соответствует районам 1 и 2, а району 3, который в прошлом испытывал техногенную нагрузку, – максимальные (85 см). Также максимальные значения глубины оттаивания наблюдаются в отдельных точках района 2 (86 см), а именно вблизи заболоченных мочажин. Основным природным фактором, влияющим на глубину сезонного оттаивания, является влажность отложений. По результатам маршрутных наблюдений выявлено, что наименьшая глубина характерна для сухих торфяных кочек в микрорайоне 1 с развитой лесной растительностью (45 см в среднем), тогда как в более увлажненных местах микрорайонов 2 и 3 она увеличивается в среднем до 48–49 см.

На площадке «Наледь» средняя глубина сезонного оттаивания в конце летнего сезона за период 2022-2025 гг. составила от 44 до 47 см. Щебнистые отложения, расположенные в микрорайоне 3, имеют наибольшую глубину оттаивания (>70 см).

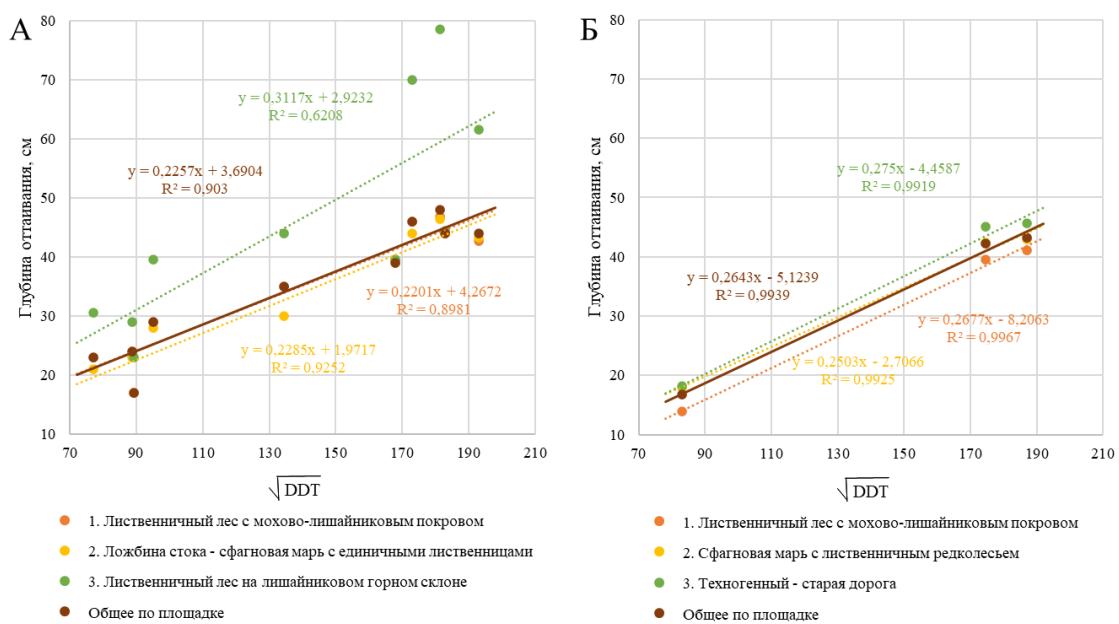


Рис. 3. Связь глубины сезонного оттаивания с индексом оттаивания для площадок CALM А) «Наледь» и Б) «Усть-Омчуг».

Анализ связи индекса оттаивания (\sqrt{DDT}) с мощностью сезонно-талого слоя показал, что коэффициент корреляции для каждого микрорайона площадок CALM

достигает 0.9, за исключением микрорайона 3 на площадке «Наледь» (рис. 3). Это связано с тем, что на данном участке несколько точек находится в щебнистых отложениях, где метод прямого измерения глубины сезонного оттаивания дает большую погрешность.

На территории Магаданской области проведены научно-исследовательские работы, направленные на определение особенностей сезонного оттаивания пород на двух площадках CALM. Установлено, что главными факторами, влияющими на глубину сезонного оттаивания, являются климатические характеристики, а также влажность и состав отложений.

На площадках «Наледь» и «Усть-Омчуг» за период параллельных наблюдений среднее значение глубины сезонного оттаивания составило 45 и 43 см, соответственно. Коэффициент вариации по площадкам на период максимального оттаивания равен 0.16–0.20, в летний период он достигает 0.25.

Выявлена линейная связь между индексом протаивания (\sqrt{DDT}) и внутригодовым ходом глубины сезонного оттаивания пород в различных микрорайонах. В микрорайонах с относительно низким поверхностным увлажнением глубина сезонного оттаивания меньше, чем в заболоченных участках.

Таким образом, результаты исследования отмечают важность учета ландшафтных особенностей и свойств отложений при оценке глубины сезонного оттаивания.

ЛИТЕРАТУРА

Замолотчикова С.А., Зуев И.А. Юкагиро-Ануйский и Колымский регионы // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. С. 293-309.

Макарьева О.М., Абрамов Д.А., Землянкова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным термометрических скважин за 2021–2022 годы // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 3. С. 19–33. doi: 10.15372/KZ20240302

Методы геокриологических исследований / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.

Порфириев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 12. С. 1228-1239. doi: 10.31857/S0869-587389121228-1239

Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перльштейн Г.З., Романовский В.Е., Безделова А.П., Алексютина Д.М., Болотюк М.М., Хименков А.Н., Капралова В.Н., Мотенко Р.Г., Малеева А.Н. Фоновый геокриологический мониторинг в северном Забайкалье // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 3. С. 24-32.

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results // Polar Geography. 2000. Vol. 24. Is. 3. P. 165-258. doi: 10.1080/10889370009377698

Hjort J., Streletskiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. P. 24-38. doi: 10.1038/s43017-021-00247-8

Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N. Geocryological conditions of small mountain catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // Geosciences. 2024. Vol. 14. P. 88. doi: 10.3390/geosciences14040088

Nelson F.E., Shiklomanov N.I., Mueller G.R., Hinkel K.M., Walker D.A. Estimating active-layer thickness over a large region: Kuparuk River Basin, Alaska, USA // Arctic and Alpine Research. 1997. Vol. 29, no. 4. P. 367-378. doi: 10.1080/00040851.1997.12003258

SPATIO-TEMPORAL CHANGES IN SEASONAL THAW DEPTH OF ROCKS IN THE UPPER KOLYMA HIGHLANDS

*Abramov A.D.^{1,2}, Mikhailova A.A.², Makarieva O.M.³, Zhunusova O.R.³, Nikitina P.A.³,
Zemlianskova A.A.³, Nesterova N.V.³*

¹Institute of the Cryosphere of the Earth, TSC SB RAS, Tyumen, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

The paper considers the spatio-temporal changes in the depth of ground seasonal thawing in the Upper Kolyma Highlands, as well as its dependence on climatic and landscape factors. Due to the degradation of permafrost as a result of climate change, this topic is important not only from a scientific but also from a practical point of view. The depth of ground seasonal thawing affects the choice of construction method when designing engineering structures in the cryolithozone, and its change can negatively affect their operation. The work is based on factual material obtained as a result of comprehensive geocryological studies in 2022–2025. Fieldwork included observations at two sites at the field research station “Anamngynda aufeis” using the CALM program methodology, micro-zoning of sites according to the conditions of surface heat exchange with sediments. Physical properties of ground were determined by field and laboratory methods. Differences in the seasonal thawing regime were revealed at two similar landscape sites located 20 km apart, associated with high variability of climatic characteristics in the mountain region. The thickness of the peat affects the depth of ground seasonal thawing: with values less than 20 cm, the thawing depth can reach 60 cm, with an increase, it decreases to 30-40 cm. Regional formulas have been obtained that allow determining the depth of ground seasonal thawing depending on the sum of positive degree hours. For the poorly studied territory of the Upper Kolyma Highlands, such results make it possible to better understand the patterns of spatio-temporal dynamics of permafrost.

Keywords: *active layer, seasonal thawing, permafrost, the field research station “Anamngynda aufeis”, Magadan region, CALM, geocryological monitoring, landscape, climate*

REFERENCES:

- Zamolodchikova S.A., Zuev I.A. Yukagiro-Anyuyskiy i Kolymskiy regiony [Yukagir-Anuy and Kolyma regions]. In: *Geokriologiya SSSR. Vostochnaya Sibir' i Dal'niy Vostok* [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. Moscow: Nedra, 1989, pp. 293-309. (in Russian).
- Makarieva O.M., Abramov D.A., Zemlianskova A.A., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Temperatura mnogoletnemerzlykh porod Verkhnekolymskogo nagor'ya po dannym termometricheskikh skvazhin za 2021–2022 gody [Temperature of permafrost in the Upper Kolyma Highlands according to thermometric well data for 2021–2022]. *Earth's Cryosphere*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 19-33. (in Russian). doi: 10.15372/KZ20240302
- Metody geokriologicheskikh issledovaniy [Methods of geocryological research]. Ed. by E.D. Yershov. Moscow: Moscow State University Press, 2004. 512 p. (in Russian)
- Porfirev B.N., Eliseev D.O., Strelets'kiy D.A. Ekonomicheskaya otsenka posledstviy degradatsii vechnoy merzloty pod vliyaniyem izmeneniy klimata dlya ustoychivosti dorozhnoy infrastruktury v Rossiyskoy Arktike [Economic assessment of the consequences of permafrost degradation under the influence of climate change for the sustainability of road infrastructure in the Russian Arctic]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2019, vol. 89, no. 12, pp. 1228-1239. doi: 10.31857/S0869-587389121228-1239 (in Russian).
- Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Perlshteyn G.Z., Romanovsky V.E., Bezdeleyova A.P., Aleksyutina D.M., Bolotuk M.M., Khimenkov A.N., Kapralova V.N., Motenko R.G., Maleeva A.N. Fonovyy geokriologicheskiy monitoring v severnom Zabaykal'ye [Background geocryological monitoring in Northern Transbaikalia]. *Earth's Cryosphere*, 2016, vol. XX, no. 3, pp. 24-32. (in Russian).
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results // *Polar Geography*. 2000. Vol. 24. Is. 3. P. 165-258. doi: 10.1080/10889370009377698
- Hjort J., Strelets'kiy D., Doré G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. P. 24-38. doi: 10.1038/s43017-021-00247-8
- Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N. Geocryological conditions of small mountain catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // *Geosciences*. 2024. Vol. 14. P. 88. doi: 10.3390/geosciences14040088

Nelson F.E., Shiklomanov N.I., Mueller G.R., Hinkel K.M., Walker D.A. Estimating active-layer thickness over a large region: Kuparuk River Basin, Alaska, USA // Arctic and Alpine Research. 1997. Vol. 29, no. 4. P. 367-378. doi: 10.1080/00040851.1997.12003258