

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Абрамов Д.А., Михайлова А.А., Землянскова А.А., Макарьева О.М., Осташов А.А., Никитина П.А.

Закономерности сезонного оттаивания пород на площадках CALM в Верхнеколымском нагорье // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.76412 EDN: FUWZKU URL:

https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=76412

Закономерности сезонного оттаивания пород на площадках CALM в Верхнеколымском нагорье

Абрамов Дмитрий Александрович

ORCID: 0000-0002-9593-0387

Инженер-исследователь; Институт криосферы Земли ТЮМНЦ СО РАН
аспирант; кафедра геоэкологии геологического факультета; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

625026, Россия, Тюменская обл., г. Тюмень, ул. Малыгина, д. 86

✉ abramovda@my.msu.ru



Михайлова Анастасия Алексеевна

ORCID: 0000-0003-0447-234X

магистр; Геологический факультет; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

119049, Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1

✉ mikh1127@yandex.ru



Землянскова Анастасия Александровна

ORCID: 0000-0002-2249-5708

кандидат технических наук

научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет
младший научный сотрудник; Северо-Восточный государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ anastasiazemlanskova@gmail.com



Макарьева Ольга Михайловна

ORCID: 0000-0002-2532-4306

кандидат технических наук

ведущий научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет
ведущий научный сотрудник; Северо-Восточный государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ omakarieva@yandex.ru



Осташов Андрей Алексеевич

ORCID: 0000-0001-5826-4138

младший научный сотрудник; Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ andrey.ostashov@gmail.com



Никитина Полина Андреевна

ORCID: 0000-0003-2439-2291

лаборант-исследователь; Санкт-Петербургский государственный университет

199034, Санкт-Петербург, ул. Университетская набережная, 7-9, Россия

✉ nikitinapolina243@gmail.com



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.76412

EDN:

FUWZKU

Дата направления статьи в редакцию:

24-10-2025

Дата публикации:

09-11-2025

Аннотация: В работе рассматривается пространственно-временное изменение глубины сезонного оттаивания пород на территории Верхнеколымского нагорья, а также ее зависимость от различных природных факторов – от климатических до ландшафтных. 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 геофизиологических исследований 2022–2025 гг. Полевые работы включали в себя наблюдения на двух площадках по методике программы CALM, микрорайонирование площадок по условиям теплообмена поверхности с отложениями. Полевыми и лабораторными методами определены физические свойства пород. Анализ данных температуры воздуха проводился как на основании собственных наблюдений, так и с метеостанции сети Росгидромет. Информация о высоте снежного покрова была получена в результате снегомерных съемок и снегомерных реек с фотоловушками. Для оценки динамики сезонного оттаивания применялся индекс оттаивания, представляющий собой сумму положительных градусочасов с начала перехода средней суточной температуры воздуха выше нуля к моменту измерений. 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. В начале периода оттаивания коэффициент вариации составляет 0.25, а к сентябрю – снижается до 0.16-0.20. 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 на любой период времени 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, оценить влияние климатических условий для дальнейшего рационального освоения региона.

Ключевые слова:

сезонно-талый слой, сезонное оттаивание, многолетнемерзлые породы, Магаданская область, CALM, геоэкологический мониторинг, ландшафт, природно-климатические факторы, климат, изменения климата

Анализ данных проведен в рамках проекта Санкт-Петербургского государственного университета «Комплексная оценка естественных и антропогенных факторов интенсификации водообменных процессов криолитозоны в условиях изменения климата» (Pure ID 95413735). Полевые исследования на территории Магаданской области в 2023–2025 гг. и обработка данных выполнены при поддержке Российского научного фонда и Правительства Магаданской области № 23-17-20011.

Введение

Важной задачей для прогнозирования рисков, связанных с деградацией многолетнемерзлых пород, является оценка изменения глубины их сезонного оттаивания. От мощности сезонно-талого слоя напрямую зависит устойчивость инженерных сооружений, проектируемых с сохранением мерзлоты (СП 25.13330.2020 «Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах»).

В настоящее время ученые прогнозируют обострение проблем, связанных с инфраструктурой в криолитозоне, как результат изменения геоэкологических условий, приводящих в том числе к увеличению глубины сезонного оттаивания [\[1-2\]](#).

Для оценки реакции многолетнемерзлых пород на изменения климатических условий в 90-х годах прошлого века мировым научным сообществом была предложена идея циркумполярного мониторинга деятельного слоя (The Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM). Она предполагала оборудование наблюдательных площадок в различных регионах криолитозоны, по всему земному шару [\[3\]](#). За 30 лет существования проекта методика подвергалась критике со стороны многих исследователей, однако простота проведения измерений и получаемый результат показали свою эффективность в условиях отсутствия наблюдательных скважин. Например, в Западной Сибири по полевым данным было установлено, что за период 2010-2020 г. наблюдалась активная деградация мерзлых толщ на площадках CALM с трендом до 4.1 см/год [\[4\]](#). При комплексировании данных различных методов геоэкологического мониторинга можно получить полное представление о реакции многолетнемерзлых пород на изменения климата [\[5; 6\]](#).

Несмотря на значимость данных о глубине сезонного оттаивания на Северо-Востоке России действует только 20 (с 18 поступали данные за 2023 год) CALM площадок, которые сосредоточены на прибрежных территориях Колымской низменности и

восточного побережья Чукотки [7-10]. В Магаданской области, где многолетнемерзлые породы занимают 99% региона, а здания построены преимущественно по первому принципу, такие наблюдения до 2022 г. не проводились.

С 2021 года на территории России организуется государственная система мониторинга состояния многолетней мерзлоты [11]. В рамках данной программы вблизи метеостанций сети Росгидромет предполагается оборудование площадок для наблюдения за глубиной сезонного оттаивания, схожих по требованиям с CALM-площадками. В Магаданской области планируется создание не более 5 таких пунктов наблюдения. В настоящий момент в общем доступе отсутствуют какие-либо сведения о выполнении программы в регионе, результаты которой по плану должны быть опубликованы в 2026 г. (РД 52.17.925-2023 «Руководство по организации и осуществлению государственного фонового мониторинга состояния многолетней мерзлоты на государственной наблюдательной сети»).

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 статьи создана и расширяется сеть наблюдения за многолетнемерзлыми породами. Она включает в себя 26 термометрических скважин, глубиной от 5 до 30 м, где для восьми скважин ряд данных составляет более трех лет [12; 13]. Также были оборудованы 2 площадки для наблюдения за глубиной сезонного оттаивания по стандартам CALM: одна – в августе 2022 года в бассейне р. Анмангында [13], 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.

Территория исследования

Верхнеколымское нагорье расположено на Северо-Востоке Российской Федерации (рис.1) и характеризуется различными ландшафтными, орографическими, климатическими, а потому и мерзлотными 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) [14] 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 (СО) в регионе варьируется от 0.1 до 4.5 м [15]. Состав и влажность пород оказывают сильное влияние на глубину СО, минимальные значения характерны для торфов (0.1–0.8 м).

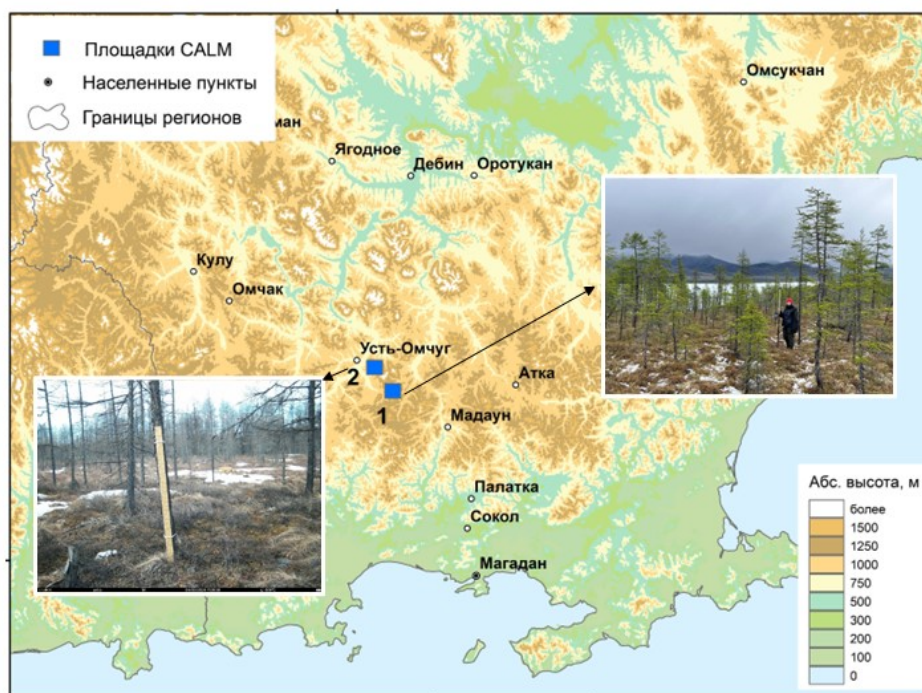


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения.

1 – CALM «Наледь», 2 – CALM «Усть-Омчуг».

Площадка «Наледь» оборудована в бассейне р. Анмангында (рис. 1) в делювиально-солифлюкционных отложениях на слабонаклонной ($5-6^\circ$) слабодренированной поверхности, ориентированной на северо-восток, на высоте 775–785 м. В долине р. Анмангында формируется гигантская наледь, наблюдения за которой проводились в XX веке [16] и возобновлены в настоящий момент коллективом авторов [17]. Растительность представлена лиственничным редколесьем на сфагновой мари с ерниками морошково-багульниково-осоковыми [18]. Высота деревьев составляет 5–8 метров, расстояние между которыми 5–10 м, диаметр ствола до 40 см. Напочвенный покров представлен мхом-сфагнумом с вкраплениями (10–50%) ягеля. На площадке выделяются 2 ложбины стока на южном и северном краях, они выражены в рельефе и идентифицируются по угнетенным лиственницам и переувлажненному напочвенному покрову. Микрорельеф относится к бугристо-западинному.

Площадка «Усть-Омчуг» оборудована в надпойменной террасе р. Детрин (рис. 1), 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, представленные галечниками с заполнителем из песка, супеси, суглинка. В 10 метрах от восточного края площадки находится тыловой шов верхнеплейстоценовой террасы р. Детрин, на которой распространены полигонально-жильные структуры. По данным скважины, установленной в 25 м от площадки, температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд (14 м) составляет -3.4°C . Напочвенный покров повсеместно представлен сфагновыми мхами. На территории всей площадки растет лиственничный лес различной степени сомкнутости крон. Помимо этого, на северном, западном и, возможно, южном краях площадки виднеются старые следы проезда техники.

Материалы и методы

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 $\xi_{\text{отт}}$, точность измерений составляет 1 см. Для обнаружения пикета используется высокоточное GNSS оборудование, что позволяет проводить измерения из года в год в одной и той же точке. 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 [5].

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. Преимуществом данного прибора является его простота и удобство использования как в полевых, так и в лабораторных условиях [19; 20]. Рабочий элемент измерительного сенсора зонда МИТ-1 вставлялся в вертикальный борт закопушки для измерения коэффициента теплопроводности талого слоя. Установка зонда в мёрзлые слои производилась в предварительно просверленные ручной дрелью отверстия. Для улучшения контакта между измерительным сенсором и породой использовалась теплопроводящая смазка, наносимая на тело зонда непосредственно перед его установкой. Установленный датчик при измерениях как в талом, так и в мёрзлом состоянии, оставлялся в толще для установления теплового равновесия между породой и щупом сенсора, по достижении которого производились измерения.

При измерении коэффициента теплопроводности (λ , Вт/м·К) при помощи зонда МИТ-1 задавалось значение мощности нагрева (0.25 Вт/м·К), фиксировались значения начальной и конечной температуры, в результате чего определялся коэффициент теплопроводности горной породы. Также в ходе проведения работ были отобраны 8 образцов для определения естественной влажности (W_e , %), плотности сложения (ρ , г/см³), температуры начала замерзания (t_{bf} , °C), относительного содержания органического вещества (I_r , %), зольности (Z , %), и засоленности (D_{sal}) исследуемых отложений.

Температура начала замерзания (t_{bf}) определялась криоскопическим методом [19; 20], основанным на том, что при фазовом переходе вода – лёд (лёд – вода) выделяется или поглощается избыток энергии в виде теплоты кристаллизации. Замерзание и оттаивание породы происходит в определенном диапазоне температур.

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}) [21-23]. 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).

Результаты исследований

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.

Микрорайонирование площадок по условиям теплообмена с поверхностью.

Дешифрирование снимков БПЛА позволило провести районирование площадок, на основе которого в дальнейшем выполнен анализ влияния ландшафтных условий на глубину сезонного оттаивания. Так, на площадке «Наледь» было выделено 3 микрорайона (рис. 2А):

- 1 . Лиственничный лес с мохово-лишайниковым покровом. Занимает большую часть площадки.
- 2 . Ложбина стока. Сфагновая марь с единичными лиственницами. Характеризуется повышенным увлажнением.
3. Лиственничный лес на лишайниковом горном склоне. Занимает небольшую площадь в северо-западном углу площадки и характеризуется отсутствием тонкодисперсных отложений и торфа. Вследствие этого глубина сезонного оттаивания может быть выше за счет инфильтрации осадков в щебнистых отложениях.

На площадке CALM «Усть-Омчуг» также выражены 3 микрорайона (рис. 2Б):

1. Лиственничный лес с мохово-лишайниковым покровом.
2. Сфагновая марь с лиственничным редколесьем. Занимает большую часть площадки. Для данного микрорайона характерны небольшие озерца и редко стоящие лиственницы, сильно заболочен.
3. Техногенный. На условия теплообмена влияют старые следы техники, из-за которых напочвенный покров нарушен. Вследствие этого характеризуется сильной заболоченностью из-за развивающегося термокарста.

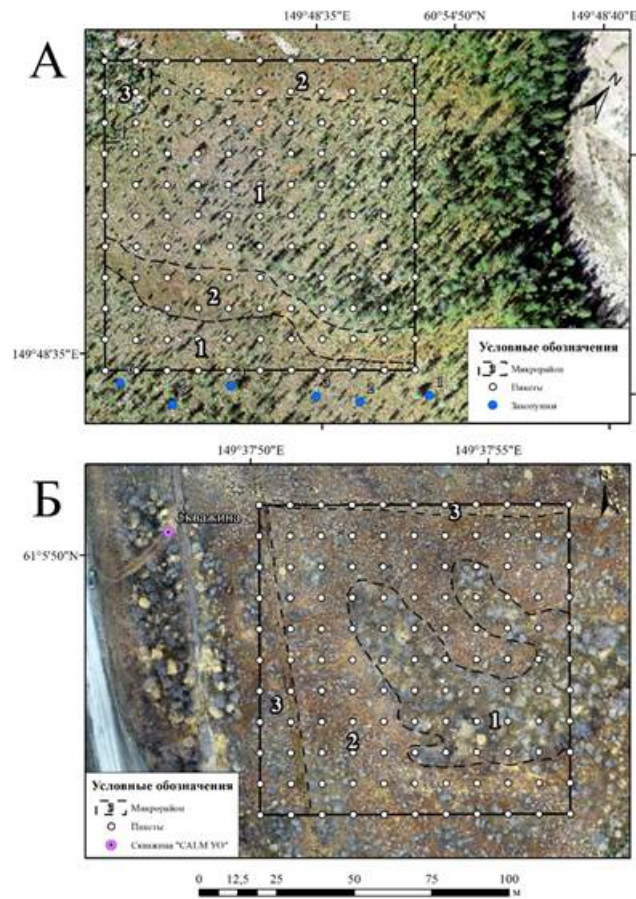


Рис. 2. Карты-схема площадок CALM А) «Наледь» и Б) «Усть-Омчуг».

Физические характеристики отложений на площадке CALM «Наледь» и их роль в формировании глубины сезонного оттаивания.

Для площадки «Наледь» определены физические характеристики отложений. В полевых условиях было выделено два основных типа пород – торф и суглинков, которые закономерно отличаются по свойствам и тем самым определяют глубину оттаивания (табл. 1).

Таблица 1. Физические характеристики отложений площадки CALM «Наледь»

	λ , Вт/м×К	W_e , %	ρ , г/см ³	t_{bf} , °C	$\xi_{отт}$, см	Z	I_r , %	D_{sal}
Торф	0.55–0.62	149.5–353.7	0.91–1.08	-0.09 – -0.15	30–40	3.91–4.43	95.7–96.4	0.64–6.64
	1.48–2.23*							
Суглинок	0.82 – 1.02	41.1–64.2	1.70–1.88	-0.08 – -0.12	65	x	x	x
	1.68–1.96*							

λ – коэффициент теплопроводности, W_e – естественная влажность, ρ – плотность сложения, t_{bf} – температура начала замерзания, $\xi_{отт}$ – глубина сезонного оттаивания в точке отбора образцов, Z – зольность, I_r – относительное содержание органического

вещества, D_{sal} – засоленность;

* – теплопроводность мерзлой породы.

Температура начала замерзания у отложений отличается незначительно: у суглинка $t_{\text{bf}} = -0.1$ °C, торфа = -0.14 °C. Вариации t_{bf} можно объяснить различиями в плотности сложения и влажности образцов (доля прочносвязанной воды меньше у суглинка, а значит, он замерзает при более высокой температуре). Принципиальная разница коэффициента теплопроводности суглинка и торфа приводит к увеличению глубины сезонного оттаивания в местах, лишенных торфяной подушки, которых на площадке достаточно, но узлы сетки могут не попадать в такие точки. Помимо этого, различная влажность и, соответственно, льдистость отложений приводит к увеличению температурной сдвижки в торфах, где разница между коэффициентами теплопроводности в талом и мерзлом состояниях может достигать 1.6 Вт/м·К.

Для торфов были определены степени разложения с помощью полевого метода – с использованием мазка. Так, торф на площадке исследования средней или сильной степени разложения, по генезису относится к верховому. Для некоторых образцов был определен химический анализ водной вытяжки. По полученным данным, торф имеет засоленность D_{sal} от 0.6 до 6%, тип засоления – хлоридный, зольность – 4%, относительное содержание органического вещества – 96%.

При одинаковой температуре у торфов количество незамёрзшей воды больше, чем в суглинках, что связано с дисперсностью и увеличением удельной поверхности. Наименьшие значения количества незамёрзшей воды у образцов сильноразложившегося торфа, при этом имеет место вариация ее количества из-за различной степени засоления образцов. Также у среднеразложившегося торфа содержание незамёрзшей воды больше, чем у сильноразложившегося, в соответствии с увеличением количества органического вещества.

При малой мощности торфа (менее 20 см) глубина сезонного оттаивания составляет порядка 60 см, тогда как при увеличении его мощности глубина СО сокращается до 30–40 см. По результатам наблюдений глубины оттаивания пород более 50 см обнаружены на отдельных пикетах, попадающих на мочажины, лишенные торфа. Таким образом, сетка наблюдений через каждые 10 м не может показать все многообразие микроландшафтов, из-за чего отдельные точки, попадающие на мочажины, могут вносить ошибку в среднюю глубину сезонного оттаивания по площадке [\[5\]](#).

Влияние ландшафтов 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 (рис. 3), а району 3, который в прошлом испытывал техногенную нагрузку, максимальная (85 см). Также максимальные значения СО наблюдаются в отдельных точках района 2 (86 см), а именно вблизи заболоченных мочажин (табл. 2). Основным природным фактором, влияющим на глубину сезонного оттаивания, является влажность отложений. По результатам маршрутных наблюдений выявлено, что наименьшая глубина СО 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 глубину сезонного оттаивания оказывают влияние условия зимнего периода: даты образования и схода снежного покрова, его высота, температура воздуха, а также летнего: начало и конец летнего периода, температура воздуха [24-26]. По данным м/с Усть-Омчуг сумма зимних градусочасов 2022 – 2023 г. (-124 000 °С×ч) ниже, чем зимой 2023 – 2024 г. (-117 400 °С×ч), тогда как сумма летних градусочасов 2023 г. (31 760 °С×ч) выше, чем в 2024 г. (25 821 °С×ч), а высота снежного покрова в обе зимы составляла в среднем по площадке 60 см. Сопоставимая глубина сезонного оттаивания в оба года показывает неоднозначность влияния температуры воздуха на глубину сезонного оттаивания, так как менее суровая зима нивелируется холодным летом, и наоборот.

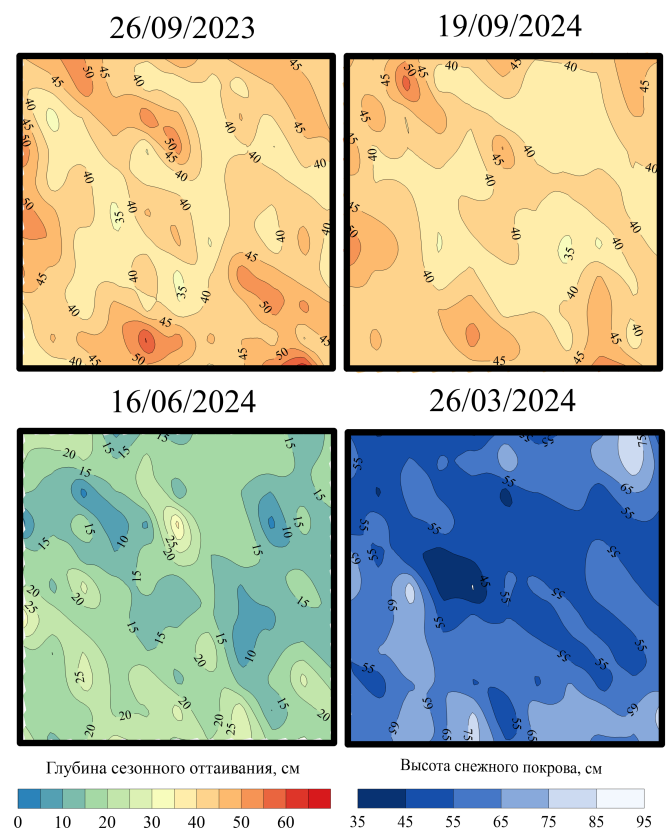


Рис. 3. Результаты измерений глубины сезонного оттаивания и высоты снежного покрова на площадке CALM «Усть-Омчуг».

Таблица 2. Глубины сезонного оттаивания на площадке «Усть-Омчуг» на конец теплого периода за 2 года измерений

Микрорайон и его ландшафтные особенности		N	Глубина сезонного оттаивания, см			
			сред.	мин.	макс	Кв
1	Лиственный лес с мохово-лишайниковым покровом	96	45	32	66	0.12
	Сфагновая марь с лиственным					

2	редколесьем. Занимает большую часть площадки. Характерны небольшие озерца и редко стоящие лиственницы, сильно заболочен	189	48	32	86	0.15
3	Техногенный. Напочвенный покров нарушен. Вследствие этого характеризуется сильной заболоченностью из-за развивающегося термокарста	78	49	35	85	0.14

N – количество замеров; Кв – коэффициент вариации

По итогам наблюдений на площадке «Наледь» средняя глубина сезонного оттаивания в конце летнего сезона за период 2022-2025 гг. составила от 44 до 47 см (табл. 3). Минимальная глубина СО приурочена к микрорайону 1 (32 см), где развита лесная растительность и относительно ложбин стока (микрорайон 2) малая поверхностная влажность (рис. 4). Щебнистые отложения, расположенные в микрорайоне 3 площадки «Наледь», имеют наибольшую глубину оттаивания (>70 см).

Таблица 3. Глубины сезонного оттаивания на площадке «Наледь» на конец теплого периода 2022-2025 гг.

Микрорайон и его ландшафтные особенности		N	Глубина сезонного оттаивания, см			
			сред.	мин.	макс.	Кв
1	Лиственничный лес с мохово-лишайниковым покровом	332	45	32	75	0.14
2	Ложбина стока. Сфагновая марь с единичными лиственницами. Характеризуется повышенным увлажнением	132	44	35	61	0.11
3	Лиственничный лес на лишайниковом горном склоне. Тонкодисперсных отложения и торф практически отсутствуют	20	67	35	116	0.28

N – количество замеров; Кв – коэффициент вариации

Результаты данных наблюдений за снежным покровом позволили установить, что средняя высота снега за период 2022–2025 гг. в декабре–феврале составила 32–52 см. Минимальная высота снега наблюдалась в 2023/2024 г., что способствовало его раннему (на неделю) сходу, по сравнению с другими рассматриваемыми периодами, а также

уменьшению тепляющего влияния.

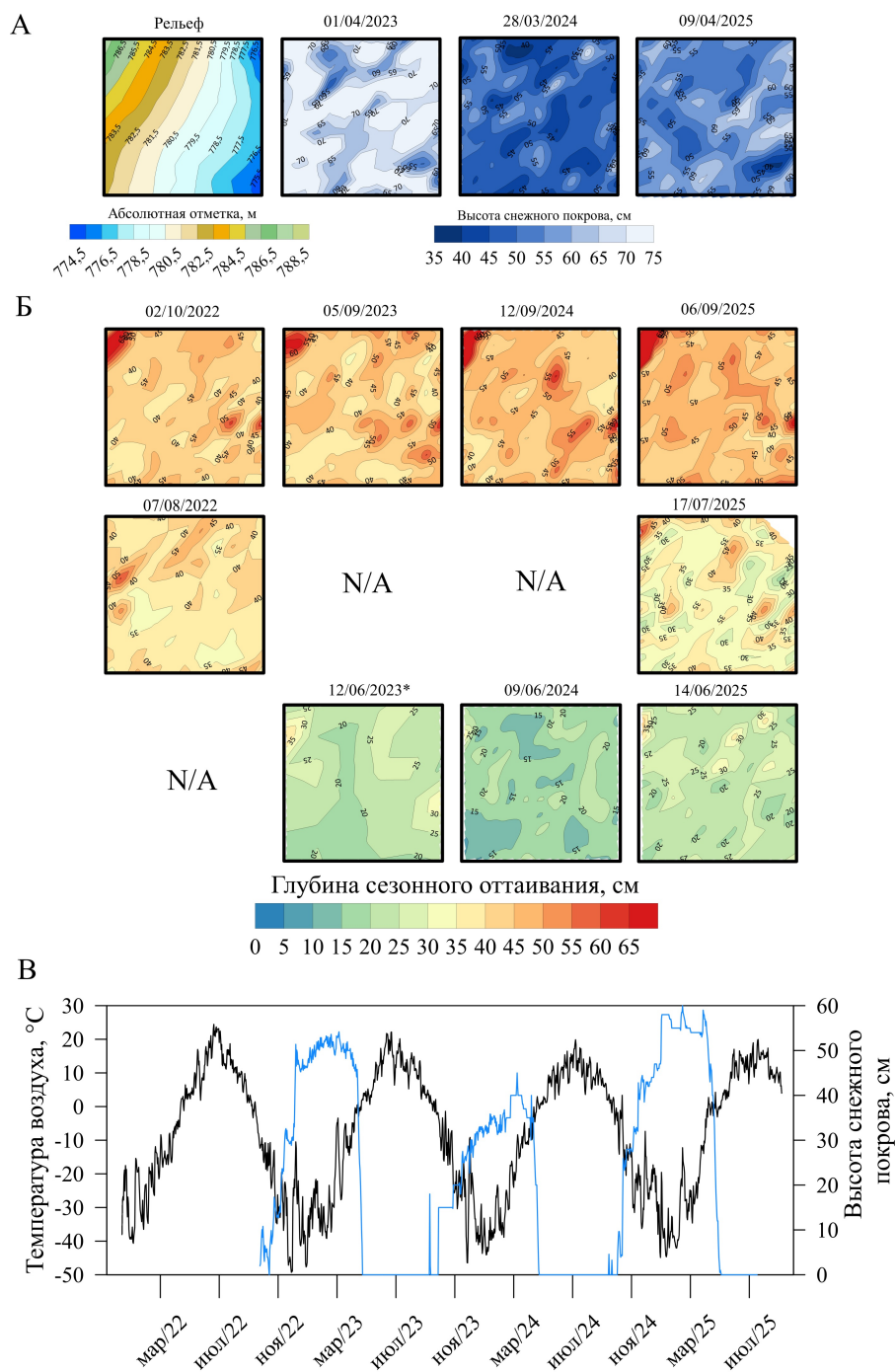


Рис. 4. Результаты наблюдений на площадке CALM «Наледь»: А) Рельеф и высота снежного покрова; Б) Глубина сезонного оттаивания, *измерения проведены в 36 точках; В) Температура воздуха и высота снежного покрова (данные по снежному покрову зимой 2021-2022 отсутствуют) по данным Сокол М-1 и фотоловушка.

Площадной анализ изменчивости снежного покрова показал, что во всех выделенных микрорайонах его высота сопоставима и варьируется в пределах ± 1 см. В точках, где наблюдалась максимальная высота снега, связь с глубиной СО не установлена. Таким образом, влияние снежного покрова на глубину сезонного оттаивания однородно по площадке.

Количество дней с положительной среднесуточной температурой воздуха с 2023 по 2025 гг. варьировалось от 145 до 152 дней, что не является серьезным изменением для

анализа их влияния на глубину СО. В то же время величина летних градусочасов за 3 года составило соответственно 31761°С×ч; 25821°С×ч; 35542°С×ч. Так, можно выделить холодное лето 2024 г. и теплое 2025 г. Количество зимних градусочасов за тот же период уменьшается со -124015 до -112336 °С×ч. Это позволяет сделать вывод, что относительно большая (47 см) средняя глубина сезонного оттаивания на площадке в 2025 г. обусловлена высокой температурой воздуха 2024/2025 г.

Сравнивая схожие микрорайоны на 2 площадках (микрорайон 1), которые характеризуются развитой лесной растительностью и относительно низкой увлажненностью поверхности, можно отметить соответствие средней глубины сезонного оттаивания, которая равна 45 см. В то же время в микрорайонах с повышенной увлажненностью (микрорайон 2) средняя глубина СО на площадке «Наледь» ниже (44 см), а на «Усть-Омчуг», наоборот, выше (48 см) средних значений. Мы связываем это с тем, что на площадке «Усть-Омчуг» есть открытые водные поверхности, способствующие конвективному переносу тепла в отложения.

Средняя глубина сезонного оттаивания на площадках CALM «Наледь» и «Усть-Омчуг» отличается на 2 см. Это может быть связано с тем, что площадка «Наледь» находится на склоне, который позволяет обеспечивать слабый дренаж, тогда как другая площадка расположена на ровной заболоченной местности, из-за чего более высокая льдистость торфяной подушки обеспечивает более длительный период оттаивания. В то же время средняя высота снежного покрова на 10 см больше на площадке «Усть-Омчуг», что должно обеспечивать больший утепляющий эффект нежели на «Наледи». Отсутствие лабораторных исследований на данном участке не позволяет выявить другие связи.

Анализ связи индекса оттаивания (\sqrt{DDT}) с глубиной сезонного оттаивания показал, что коэффициент корреляции для каждого микрорайона площадок CALM достигает 0.9, за исключением микрорайона 3 на площадке «Наледь» (рис. 5). Это связано с тем, что на данном участке несколько точек находится в щебнистых отложениях, где метод прямого измерения глубины сезонного оттаивания дает большую погрешность.

Таким образом, на 2 площадках, расположенных в 20 км друг от друга, режим сезонного оттаивания схож вследствие того, что пункты наблюдения оборудованы в торфяниках, однако присутствуют существенные отличия во времени начала оттаивания. Помимо этого, разница средней глубины сезонного оттаивания в 2 см, несмотря на малую величину говорит о различии климатических условий, во многом определяющих глубину СО. Это характерно для горных районов с суровыми климатическими условиями.

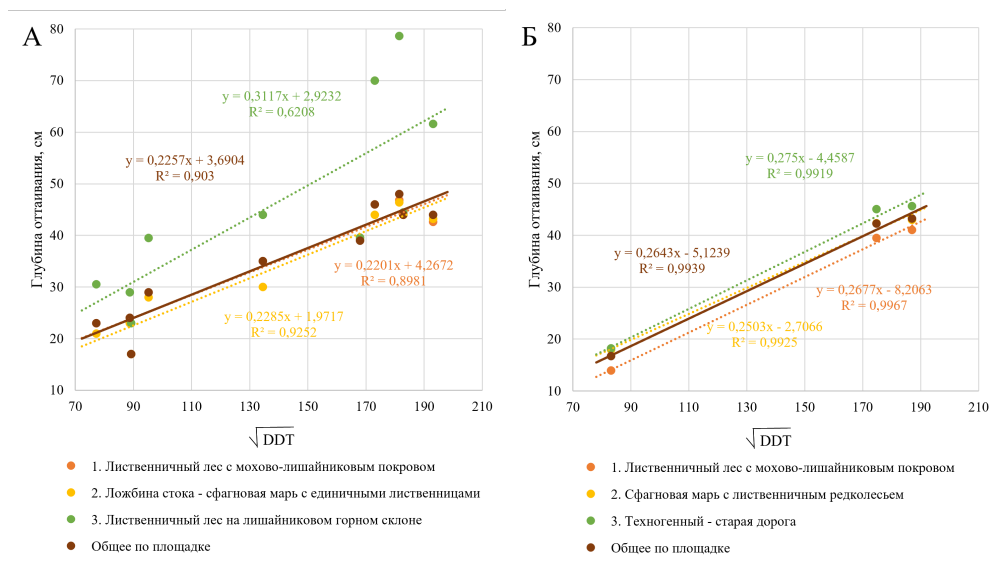


Рис. 5. Связь глубины сезонного оттаивания с индексом оттаивания

для площадок CALM А) «Наледь» и Б) «Усть-Омчуг».

Выводы

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, что можно косвенно оценивать по степени дренирования поверхности. Пространственная вариация глубины сезонного оттаивания на двух площадках ($K_v < 0.2$) оценивается как средняя.

Проведены исследования физических свойств отложений полевыми и лабораторными методами, ландшафтное районирование площадок, выполненное на основании маршрутных исследований и аэрофотосъемки. Полученные результаты подтверждают, что даже в пределах участка 100×100 м особенности микроландшафтов и состава отложений существенно влияют на пространственную изменчивость глубины сезонного оттаивания.

На площадках «Наледь» и «Усть-Омчуг» за период параллельных наблюдений среднее значение глубины сезонного оттаивания составило 45 и 43 см, соответственно. По данным ближайших термометрических скважин, оборудованных в схожих ландшафтах, мощность СТС достигает 0.75–1.0 м [12]. 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 или ложбинах стока.

Помимо этого, важной характеристикой в горном районе является высота местности, т. к. это во многом она определяет начало периода оттаивания, которое происходит сразу после схода снежного покрова.

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

Библиография

1. Порфирьев 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. EDN: BWVJSZ.
2. 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. EDN: JSXFHX.
3. 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. P. 165–258. DOI: 10.1080/10889370009377698. EDN: MAWIHP.
4. Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A. et al. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 2311. DOI: 10.3390/en15072311. EDN: RDGTTA.

5. 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. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(24-32). EDN: WTHONP.
6. Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D., Shiklomanov N., Pastukhov A., Novakovskiy A., Sadurtdinov M., Skvortsov A., Tsarev A., Pochikalov A., Malitsky S., Kraev G. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // Polar Geography. 2021. Vol. 44. P. 203-216. DOI: 10.1080/1088937X.2021.1981476. EDN: RIEZCO.
7. Zamolodchikov D. G., Kotov A. N., Karelin D. V., Razzhivin V. Yu. Active-layer monitoring in Northeast Russia: spatial, seasonal, and interannual variability // Polar Geography. 2004. Vol. 28, no. 4. P. 286-307. DOI: 10.1080/789610207. EDN: LIKNQV.
8. Fyodorov-Davydov D. G., Sorokovikov V. A., Ostroumov V. E., Kholodov A. L., Mitroshin I. A., Mergelov N. S., Davydov S. P., Zimov S. A., Davydova A. I. Spatial and temporal observations of seasonal thaw in the Northern Kolyma Lowland // Polar Geography. 2004. Vol. 28, no. 4. P. 308-325. DOI: 10.1080/789610208. EDN: LIPPWD.
9. Маслаков А. А., Рузанов В. Т., Фёдоров-Давыдов Д. Г., Краев Г. Н., Давыдов С. П., Замолотчиков Д. Г., Трегубов О. Д., Шикломанов Н. И., Стрелецкий Д. А. Сезонное протаивание пород в Берингии на фоне современных климатических изменений // Arctic Environmental Research. 2017. № 4. С. 283-294. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.283. EDN: YWKJSC.
10. Маслаков А. А. Результаты исследований сезонного протаивания пород в районе пос. Лорино (Восточная Чукотка) // Арктика и Антарктика. 2017. № 1. С. 127-139. EDN: YHVAEN.
11. Брушков А. В. Проблемы создания системы государственного мониторинга вечной мерзлоты // Фундаменты. 2022. № 3(9). С. 4-9. EDN: SPCPUN.
12. Макарьева О. М., Абрамов Д. А., Землянскова 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. EDN: XJQOYL.
13. Makarieva O., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A. Geocryological conditions of small mountain catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // Geosciences. 2024. Vol. 14. P. 88.
14. Справочник по климату СССР. Чукотский национальный округ и Магаданская область. Вып. 34, ч. 2. М.: Гидрометеиздат, 1966. 288 с.
15. Замолотчикова С. А., Зуев И. А. Юкагино-Ануйский и Колымский регионы // Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. С. 293-309.
16. Букаев Н. А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховьях р. Колымы (на примере Анмангындинской наледи) // Наледи Сибири. М.: Наука, 1969. С. 62-78.
17. Осташов А. А., Макарьева О. М., Мазурок А. В., Нестерова Н. В., Землянскова А. А. Методика применения беспилотных авиационных систем для оценки морфометрических характеристик наледей // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX, № 4. С. 64-74.
18. Васильев А. И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина. Якутск, 2022. С. 182-186. EDN: MQWFLZ.
19. Методы геокриологических исследований / под ред. Э. Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
20. Мотенко Р. Г., Давлетова Р. Р., Гречищева Э. С., Алексеев А. А. Экспериментальная

- оценка влияния заторфованности на фазовый состав воды в мерзлых грунтах различного гранулометрического состава // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. № 1. С. 116-122. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-1-116-122. EDN: KBMJON.
21. Christiansen H. H. Data on snow cover depletion and ground thawing at two sites at Zackenberg, in high Arctic northeast Greenland, 1996–2000 // Permafrost and Periglacial Processes. 2004. Vol. 15, no. 1. P. 1-10.
22. 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: 10.2307/1551985. EDN: YBAOEM.
23. Talucci A. C., Loranty M. M., Holloway J. E. et al. Permafrost-wildfire interactions: active layer thickness estimates for paired burned and unburned sites in northern high latitudes // Earth System Science Data. 2024. Vol. 17. P. 2887–2909.
24. Streletskiy D. A., Shiklomanov N. I., Nelson F. E., Klene A. E., Nyland K. E., Moore N. J. Global observation data show variable but increasing active-layer thickness // American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts. San Francisco, 2020.
25. Romanovsky V. E., Osterkamp T. E. Interannual variations of the thermal regime of the active layer and near-surface permafrost in northern Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 1995. Vol. 6. P. 313-335. DOI: 10.1002/ppp.3430060404. EDN: XXYSRE.
26. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D. A., Schoeneich P., Romanovsky V. E., Lewkowicz A. G., et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature Communications. 2019. Vol. 10. P. 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4. EDN: HTZKKV.

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом статьи является изучение закономерностей сезонного оттаивания пород на площадках CALM в Верхнеколымском нагорья Магаданской области.

Актуальность исследования не вызывает сомнений, поскольку, как отмечает автор «в настоящее время ученые прогнозируют обострение проблем, связанных с инфраструктурой в криолитозоне, как результат изменения геокриологических условий, приводящих в том числе к увеличению глубины се-зонного оттаивания многолетнемерзлых пород».

В связи с этим, основной целью исследования является определение фак-торов, влияющих на пространственно-временное изменение глубины сезонно-го оттаивания пород, в пределах Верхнеколымского нагорья по данным наблюдений на CALM-площадках.

Методология исследования основана на применении CALM-метода, т.е. циркумполярного мониторинга деятельного слоя (The Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM), использовании высокоточного GNSS оборудования, фотоловушек, применении метода маршрутных исследований и дешифрирования материалов аэрофотосъемки при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА). В ходе проведения работ были отобраны 8 образцов грунта для определения естественной влажности (W_e , %), плотности сложения (ρ , г/см³), температуры начала замерзания (t_{bf} , °C), относительного со-держания органического вещества (I_r , %), зольности (Z , %), и засоленности (D_{sal}) исследуемых отложений. Для оценки влияния климатических факторов на глубину сезонного

оттаивания использовали индекс оттаивания, для анализа климатических условий использовали данные метеорологической станции Усть-Омчуг.

В статье автором упущена научная новизна проводимых исследований. Данное замечание необходимо учесть автору.

Стиль статьи – научный. Структура и объём научной статьи соответствуют требованиям журнала. Достоинством статьи является обширный аналитический материал, таблицы, фото экспериментальных площадок, карты промерзания и оттаивания грунтов, графики по уравнениям регрессии. Автором установлено по итогам наблюдений на площадке «Наледь», что средняя глубина сезонного оттаивания в конце летнего сезона за период 2022-2025 гг. составила от 44 до 47 см. Сред-няя глубина сезонного оттаивания на площадках CALM «Наледь» и «Усть-Омчуг» отличается на 2 см. Таким образом, на 2 площадках, расположенных в 20 км друг от друга, режим сезонного оттаивания схож.

Библиография статьи включает в себя 26 литературных источников, 13 из которых – на иностранных языках. Требования журнала по библиографии выдержаны.

Выводы в статье достаточно обоснованы, отражают поставленные цели и задачи исследования. Автор приходит к заключению, что имеется линейная связь между индексом протаивания и внутригодовым ходом глубины сезон-ного оттаивания пород в различных микрорайонах. В микрорайонах с относи-тельно низким поверхностным увлажнением глубина сезонного оттаивания меньше, чем в заболоченных участках или ложбинах стока.

По разделу «выводы» имеются замечания:

1. Выводы должны быть весомыми и конкретными, отражать основные результаты проведенных исследований. Поэтому, предложение «На территории Магаданской области проведены научно-исследовательские работы, направленные на определение особенностей сезонного оттаивания пород на двух площадках CALM» нужно убрать из выводов.

2. Имеются опечатки в тексте и выводах. Например, в первом абзаце выводов слитно написан предлог «на» со словом «глубину». В четвертом абзаце после словосочетания «индексом протаивания» в скобках поставить обозначение индекса, а не скриншот формулы для его расчета.

3. Последнее предложение также можно убрать из выводов.

Данные замечания не умаляют научной ценности данной статьи, она имеет важное научно-практическое значение и может быть полезна мерзлотоведам, грунтоведам и другим специалистам, работающим в криолитозоне.

Рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения незначительных замечаний.