

ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗ

УДК 551.345

DOI: 10.15372/KZ20250501

EDN: XZGVWZ

**МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ОСАДКИ ПОЧВ И ВЕРХНЕЙ ТОЛЩИ
МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПЛОЩАДКЕ НАУЧНОГО ПОЛИГОНА
“ПРИМОРСКИЕ РАВНИНЫ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ”****А.А. Маслаков^{1,*}, Д.А. Стрелецкий², Д.Г. Замолодчиков³**¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, кафедра криолитологии и гляциологии, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*² *Университет Джорджа Вашингтона, 20052, Вашингтон, Округ Колумбия, США*³ *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А.С. Исаева РАН, лаборатория структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, Россия***Автор для контакта; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru*

Климатические изменения в криолитозоне приводят к ряду характерных изменений природной среды, в частности, к росту температуры мерзлых пород, увеличению глубины сезонного оттаивания почвы и к активизации экзогенных криогенных процессов. В статье представлены результаты многолетнего мониторинга мощности сезонноталого слоя и вертикальных движений поверхности на площадке Циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) “Лаврентия”, расположенной на полигоне “Приморские равнины Восточной Чукотки”. Выявлено, что в результате возросшей летней теплообеспеченности за период 2004–2024 гг. скорость опускания дневной поверхности варьировала от 1.4 до 3.5 см/год, при этом скорость изменения мощности сезонноталого слоя составляла от –3.2 до +1.6 см/год. Осадка пород происходила за счет равномерного оттаивания сильнольдистого переходного слоя мерзлоты, без образования термокарстовых форм рельефа. Исследования показали, что на фоне относительно стабильных вариаций мощности сезонноталого слоя наблюдается постепенное однонаправленное опускание дневной поверхности, вызванное прогрессирующим оттаиванием переходного и промежуточного слоев почвенно-мерзлотного комплекса. Это свидетельствует о заметной недооценке темпов понижения кровли мерзлоты, полученных традиционным механическим способом.

Ключевые слова: сезонноталый слой, многолетнемерзлые породы, переходный слой, осадка при оттаивании, почвенно-мерзлотный комплекс.

Ссылка для цитирования: 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. EDN: XZGVWZ.

**LONG-TERM MONITORING OF SOIL AND UPPER PERMAFROST THAW SUBSIDENCE
AT THE EASTERN CHUKOTKA COASTAL PLAIN RESEARCH STATION****A.A. Maslakov^{1,*}, D.A. Streletskiy², D.G. Zamolodchikov³**¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Cryolithology and Glaciology Department, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*² *The George Washington University, Columbian College of Arts and Sciences, 20052, Washington DC, 2036 H St NW, USA*³ *Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity, Russian Academy of Sciences, Laboratory of structural and functional organization and resilience of forest ecosystems, Profsoyuznaya St. 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia***Corresponding author; e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru*

Climate changes in permafrost regions lead to noticeable alteration of the environmental conditions, including, in particular, an increase in permafrost temperature and depth of seasonal thaw and an activation of exogenous cryogenic processes. This paper presents the results of monitoring the active layer thickness and vertical surface displacements at the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site Lavrentiya located in the area of the “Eastern Chukotka Coastal Plains” research station. Under conditions of the increased summer heat supply over the period of 2004–2024, the rate of ground surface subsidence varied from 1.4 to 3.5 cm/yr, while changes in the active layer thickness (ALT) were from –3.2 to +1.6 cm/yr. The ground surface subsidence

took place due to the isotropic thawing of the ice-rich transient layer of the soil-permafrost complex without the formation of thermokarst landforms. Thus, against the background of relatively stable variations in the ALT, a gradual unidirectional subsidence of the surface caused by the progressive thawing of the transient and intermediate layers was observed. The results highlight a significant underestimation of the rates of permafrost table deepening obtained by the traditional mechanical probing method.

Keywords: active layer, permafrost, transient layer, thaw subsidence, soil-permafrost complex.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе летнего оттаивания почв и пород сезонноталого слоя (СТС) наблюдается процесс осадки пород, проявляющийся в виде опускания дневной поверхности. Этот процесс вызван фазовым переходом из льда в воду с уменьшением его объема. Во время осенне-зимнего промерзания СТС наблюдается обратный процесс поднятия дневной поверхности в результате пучения промерзающих отложений. Совокупность процессов сезонной осадки и пучения называется *криогенной пульсацией* [Романовский, 1993]. На участках близкого залегания к подошве СТС залежеобразующих льдов или высокольдистых отложений при увеличении глубины сезонного оттаивания может развиваться термокарст. В этом случае просадки поверхности будут иметь необратимый характер и приводить к образованию специфических форм микро- и мезорельефа [Шур, 1988] и соответствующих отложений [Романовский, 1977]. Оттаивание многолетнемерзлых пород, которое не ведет к формированию каких-либо форм рельефа, в зарубежной литературе называется изотропной осадкой при оттаивании (isotropic thaw subsidence) [Shiklomanov et al., 2013]. Таким образом, принято разделять сезонные деформации дневной поверхности, вызванные процессами пучения и осадки в сезонноталом слое, и многолетние деформации, вызванные оттаиванием пород, подстилающих СТС. В первом случае явление носит обратимый и циклический характер, во втором – вертикальные деформации земной поверхности развиваются односторонне, могут занимать годы и десятилетия, при этом их скорость имеет нелинейный характер [Баранов, Баулин, 1964].

Сезонные деформации поверхности могут иметь обратимый характер при условиях стационарного или квазистационарного климата, при котором летняя осадка оттаявших пород полностью компенсируется осенне-зимним пучением. В случаях экстремально теплых летних сезонов глубина сезонного оттаивания может затрагивать породы переходного слоя многолетней мерзлоты [Шур, 1988; Shur et al., 2005], входящего в состав почвенно-мерзлотного комплекса [Lupachev, Gubin, 2023], и приводить к повышенным значениям летней осадки почвы. Однако это явление нивелируется последующим похолоданием климата или перестройкой ландшафтов, во время которой переходный слой восстанавливается за счет консервации ранее оттаявшей части сезонноталого слоя,

или квазисинкриогенеза [Каневский, 2004]. По некоторым оценкам [Конищев, 2009], в результате естественной реакции ландшафтов на рост приземной температуры воздуха возникают обратные отрицательные связи, способствующие при определенном сочетании условий уменьшению СТС и нарастанию переходного слоя, обретающего защитную функцию. Например, если для автономных ландшафтов потепление климата ведет к росту мощности СТС и повышению температуры пород, то для подчиненных природных комплексов субаквального или супераквального типа (поймы, низкие террасы рек, мелкие речные долины, низины между грядами) наблюдается обратная ситуация, вызванная накоплением торфа и изменением теплофизических условий теплообмена в приповерхностном слое почвы [Конищев, 2003].

В результате наблюдаемого потепления климата Арктики, усилившегося с 1970-х годов [Rantanen et al., 2022], создаются условия, при которых за счет повышенного летнего теплопотока в почву происходит не только рост температуры мерзлых пород [Biskaborn et al., 2019], но и постепенное протаивание высокольдистых отложений переходного и промежуточного слоев. Осенне-зимнее пучение в этом случае не успевает компенсировать величину летней осадки пород и наблюдается постепенное, но необратимое понижение дневной поверхности. Мощность сезонноталого слоя при этом может не меняться вследствие его уплотнения по мере оттаивания высокольдистых отложений [Nyland et al., 2021]. Вследствие этого многолетние мониторинговые наблюдения за мощностью СТС, проводимые в пределах стационарных площадок при помощи мерзлотного щупа, зачастую приводят к серьезной недооценке скоростей опускания кровли ММП в различных регионах криолитозоны мира [Мажитова, Каверин, 2007; Shiklomanov et al., 2013].

Равномерное опускание дневной поверхности, вызванное современным ростом температуры приземного воздуха, имеет глобальный характер [Streletskiy et al., 2025]. Однако имеющиеся сведения о его географии и характеристиках разрознены; межгодовые тренды вертикальных движений поверхности были определены разными методами и имеют различные по протяженности временные ряды наблюдений. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли – повышение доступности радарных снимков, улучшение методов

их обработки и анализа – серьезно расширили возможности для изучения как внутрисезонных, так и межгодовых вертикальных движений земной поверхности [Zhang et al., 2022; Zwieback et al., 2024]. При этом дороговизна космоснимков, трудоемкость обработки и пространственная ограниченность их использования являются главными лимитирующими факторами в такого рода исследованиях. Таким образом, с каждым годом появляется все больше исследований об изотропной осадке при оттаивании ММП, что позволяет сформировать более целостную картину проявления этого процесса, выявить природные факторы, определяющие его скорость, и региональные особенности.

Многолетние полевые наблюдения (более 10 лет) за вертикальными движениями дневной поверхности имеют крайне ограниченный охват территорий: север и запад Аляски [Shiklomanov et al., 2013; Nyland et al., 2021], Канадский арктический архипелаг [Zhang et al., 2020], Северо-Западные территории Канады [O'Neill et al., 2023], север европейской территории России [Kaverin et al., 2021] и Средняя Сибирь [Grebenets et al., 2021]. Результаты таких исследований имеют большую научную ценность, поскольку позволяют проследить долгосрочную динамику процессов сезонной осадки и пучения пород на фоне климатических вариаций, а также оценить скорости опускания поверхности в различных мерзлотно-ландшафтных условиях, преимущественно в тундровой и лесотундровой зонах. Кроме того, полученные сведения позволяют оценить скорости понижения кровли ММП на фоне стабилизации межгодовых вариаций мощности сезонноталого слоя, измеряемой мерзлотным щупом (см., например, [Oblogov et al., 2023]).

Наряду с другими регионами криолитозоны Северного полушария, например, севером европейской территории России и Западной Сибирью [Vasiliev et al., 2020], на Чукотском полуострове также зафиксированы признаки понижения кровли многолетней мерзлоты, что подтверждается результатами мониторинга параметров СТС [Maslakov et al., 2019]. Собранные ранее сведения на площадке CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) “Лаврентия” показали [Маслаков, Комова, 2019], что процесс оттаивания верхних горизонтов многолетней мерзлоты сопровождается постепенным опусканием дневной поверхности, по скорости сопоставимым с темпами роста глубины сезонного оттаивания почвы. Однако из-за ограниченности временных рядов наблюдений за осадкой выявить ведущие факторы, определяющие пространственные и временные вариации вертикальных движений дневной поверхности, в пределах площадки не удалось.

Настоящая статья представляет собой анализ результатов многолетних полевых наблюдений (2003–2024 гг.) за максимальной глубиной сезонного оттаивания почвы и вертикальными движениями дневной поверхности в результате осадки и пучения пород на площадке CALM “Лаврентия”, расположенной в пределах стационара “Приморские равнины Восточной Чукотки” (Чукотский АО). Целью данной работы является оценка текущих скоростей опускания кровли мерзлых пород в районе исследований и выявление природных факторов, влияющих на амплитуду вертикальных движений поверхности и межгодовую скорость осадки при оттаивании ММП в пределах площадки.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Площадка “Лаврентия” (индекс R-27) была заложена Д.Г. Замолотчиковым в рамках программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring program) в 2000 г. Она занимает площадь 1 га и расположена на пологом склоне в пределах водно-ледниковой равнины, в 800 м от южного побережья залива Лаврентия (рис. 1). Площадка имеет слабый уклон (2–3°) на восток и сложена валунными суглинками водно-ледникового генезиса, оторфованными (5–30 см) с поверхности. Окружающая территория расположена в области субарктического морского климата и представлена типичными кочкарными тундрами на равнинных участках, горными и лишайниковыми тундрами в предгорьях до высот 200–300 м над ур. моря и гольцами на более высоких отметках. Более детальное описание природных условий района исследований и площадки CALM представлено в работе [Маслаков и др., 2024].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сведения о зимних и летних осадках за 2000–2023 гг. с суточным разрешением были получены из специализированных массивов для климатических исследований ВНИИГМИ–МЦД [<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>] для ближайшей метеостанции, расположенной в пос. Уэлен (66°10' с.ш., 169°50' з.д.) в 87 км к северу от района исследований. Данные о среднесуточной температуре воздуха подготовлены по реанализу пятого поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5, имеющего шаг сетки 0.25×0.25° [Hersbach et al., 2023]. Для подготовки значений среднесуточной температуры выбран набор данных ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Из него получен ряд значений температуры воздуха на уровне 2 м с 01.01.2000 г. по 06.10.2024 г. в стандартные метеорологические сроки (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 час UTC), затем

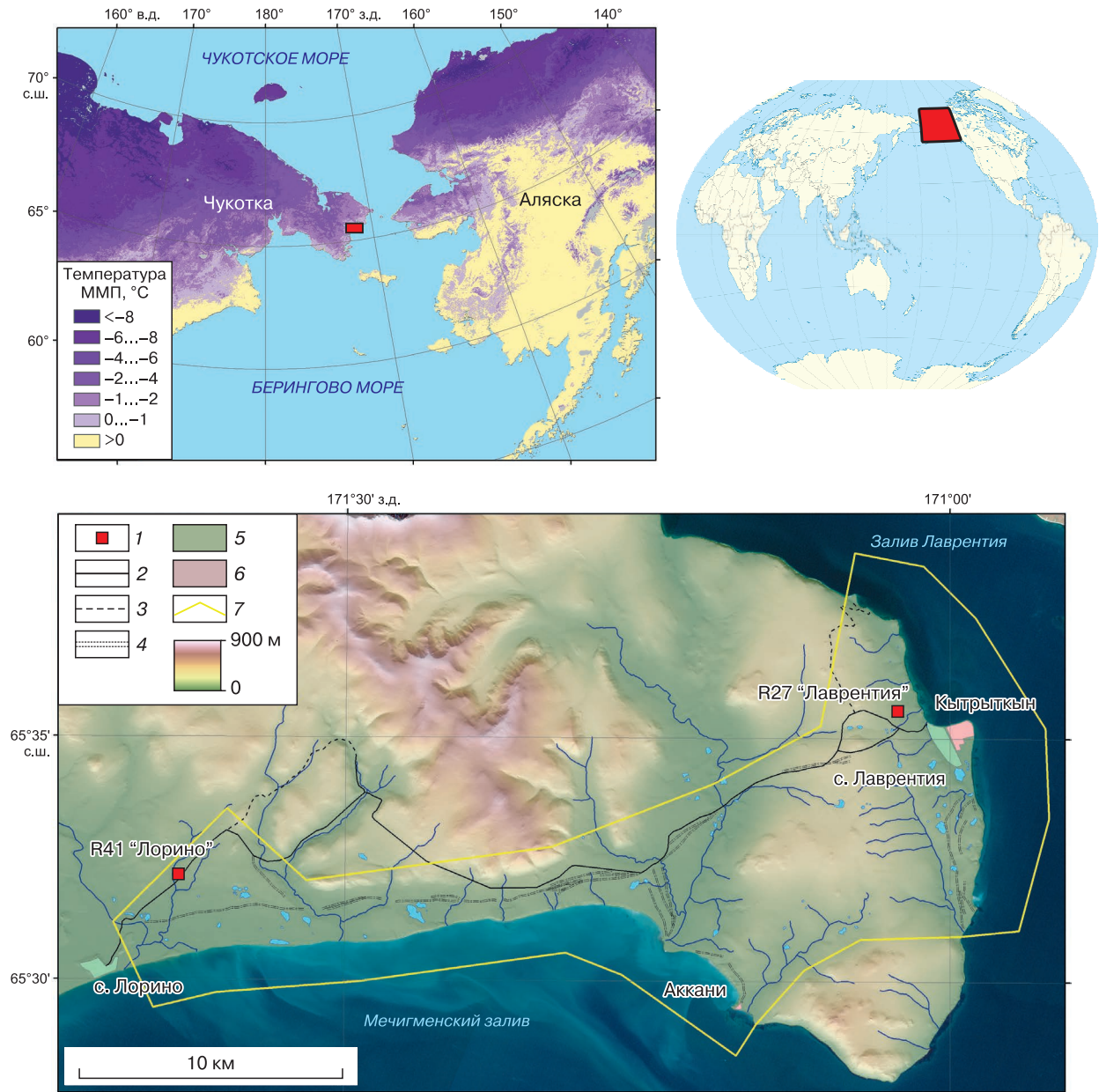


Рис. 1. Расположение площадки CALM “Лаврентия”.

1 – площадки CALM “Лаврентия” и “Лорино”; 2 – действующие дороги; 3 – заброшенные дороги; 4 – пути вездеходов; 5 – жилые поселения; 6 – заброшенные поселения; 7 – граница научного полигона “Приморские равнины Восточной Чукотки”.

выполнено осреднение по суткам. При скачивании выбран ближайший к площадке CALM узел сетки (65°50' с.ш., 171° з.д.).

Полученные данные были использованы для расчета количества осадков и индексов таяния (суммы положительных среднесуточных температур воздуха, Degree Days of Thawing – DDT) и промерзания (суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха, Degree Days of Freezing – DDF) для теплых и холодных сезонов

2000–2023 гг. Теплый период соответствует периоду оттаивания почвы и развития сезонноталого слоя, поэтому сумма положительных суточных температур воздуха, т. е. индекс таяния, хорошо согласуется с мощностью СТС при различных почвенных и растительных условиях и широко используется в геокриологических исследованиях [Nelson, Outcalt, 1987; Grebenets et al., 2021]. Индекс промерзания является характеристикой суровости предшествующей зимы и наряду со снеж-

ным покровом определяет температурное поле СТС в начале периода оттаивания почвы.

Наблюдения за глубиной сезонного оттаивания в пределах площадки “Лаврентия” начались в 2000 г. и выполняются в соответствии с протоколом CALM [Brown et al., 2000] мерзлотным щупом в узлах площадки. Измерения проводятся с четырехкратной повторностью с точностью 1 см и временным интервалом 1 месяц, что позволяет за теплый сезон (июнь–сентябрь) проводить 2–4 измерения, получая сведения как о межгодовых вариациях максимальной глубины оттаивания, так и о внутрисезонной динамике мощности СТС.

Одновременно с измерениями мощности СТС определяются величины относительных вертикальных колебаний дневной поверхности. При измерениях определяются высоты металлических марок (реперов), вмороженных в ММП на глубину не менее 50 см и установленных в узлах площадки CALM в 2003 г. – всего 121 репер (рис. 2). Измерение высоты репера производится с двух сторон рулеткой с точностью 1 мм, с упором на плоский диск, позволяющий минимизировать ошибку, связанную с неровностью поверхности и наличием мягкого мохового покрова. Анализ собранных результатов состоял в последовательном определении величины относительных колебаний дневной поверхности относительно марок за каждый период наблюдений ($\Delta\eta$). Таким образом, за 2003–2024 гг. было выполнено 66 измерений высоты

вмороженных металлических марок, позволяющих детально рассмотреть многолетние вариации дневной поверхности в пределах площадки CALM.

Важной частью проведения исследований является исключение или минимизация эффекта выпучивания реперов во время осенне-зимнего промерзания сезонного слоя. Для этой цели в конце теплого сезона (август–сентябрь) после измерения высоты марок осуществлялась оценка их устойчивости перед следующим сезоном промерзания путем оказания выдерживающей нагрузки. В случае если марка подавалась вверх, производилось ее перезабивание кувалдой на 30–50 см с последующим измерением новой высоты. Предыдущее измерение при этом исключалось из дальнейших вычислений. Оценка устойчивости марок на воздействие сил морозного пучения выполнялась на основании [Свод правил..., 2020]. Было рассчитано, что даже при максимальной глубине протаивания в 1 м в суглинистом субстрате сила выпучивания металлической марки диаметром 2 см, заглубленной всего на 10 см ниже подошвы СТС, составит 0.628 кН, в то время как расчетное значение силы, удерживающей марку от выпучивания, будет больше и составит 0.742 кН. Таким образом, применяемая методика оценки вертикальных движений земной поверхности по высоте металлических марок, если не исключает, то сводит к минимуму эффект от их выпучивания в период осенне-зимнего промерзания пород СТС.

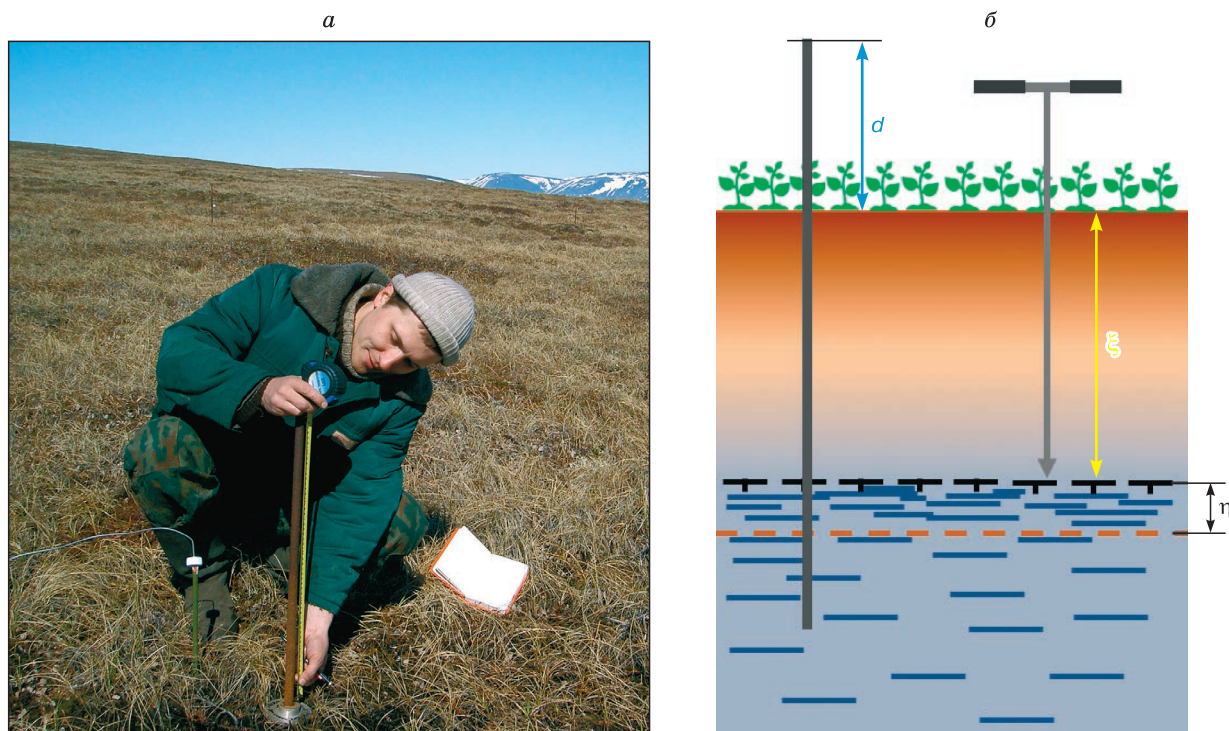


Рис. 2. Измерение высоты вмороженного репера в начале июня (а) и схема проводимых измерений (б). Фото Г.М. Зеленского, 2003 г. d – измеряемая высота кола; ξ – мощность СТС; η – сильнольдистый переходный слой ММП.



Рис. 3. Взаимное расположение площадки CALM “Лаврентия” и скважин.

Геодезические измерения поверхности (нивелирование, тахеометрическая съемка) производились в узлах площадки в 2006, 2012, 2018 и 2023 гг. в условной системе координат и высот, за исключением 2012 г., когда пространственная и высотная привязка производилась к реперной сети автодороги “Лаврентия–Лорино”, расположенной в 700 м к юго-западу от площадки. Измерения высоты поверхности осуществлялись в узлах площадки – всего 121 измерение. С целью сопоставления полученных распределений высот узлов площадки за разные годы были выполнены поправочные расчеты. Среднее значение высоты всех точек площадки 2012 г., имеющей привязку к абсолютной системе координат, сравнивалось со средней высотой точек, полученной по результатам топосъемок 2006, 2018 и 2023 гг. Полученная разница была поправкой на высоту поверхности (Δh). Поправка на изменение высоты дневной поверхности в результате сезонной осадки/пучения пород ($\Delta \eta$) рассчитывалась как сумма изменений высоты замороженных колева за рассматриваемые отрезки времени. Таким образом, результаты геодезических измерений последовательно приводились к средней высоте поверхности на 2012 г. с поправкой на $\Delta \eta$ за периоды наблюдений [Маслаков и др., 2024].

В летний период 2024 г. при помощи малого БПЛА (DJI Mini 3 Pro) была выполнена аэрофотосъемка площадки с высоты 50 м. В результате обработки снимков была получена полная трехмерная модель поверхности, ставшая основой для построения ортофотоплана и цифровой модели

местности (ЦММ) с горизонтальным разрешением 3 см.

Для характеристики поверхностных рыхлых отложений вблизи площадки CALM “Лаврентия”, в 2019–2020 гг. было пробурено несколько неглубоких скважин, из которых с интервалом 10–15 см были отобраны пробы на влажность, а также детально описаны керны (рис. 3). Скважина 2019-01 расположена в 100 м к юго-западу от юго-западного угла площадки на склоне увала, ее глубина составила 1.74 м при глубине оттаивания 0.8 м (конец августа). Скважины 2019-02 и 2019-03 были пробурены в 10–15 м от юго-восточного угла площадки, в пределах ровной поверхности, покрытой торфом и оторфованным суглинком. Их глубина составила 1.15 и 1.3 м при глубине оттаивания почвы на конец августа 0.60 и 0.63 м соответственно. Скважина 2020-06B была пробурена в середине сентября 2020 г. в 300 м к югу от площадки CALM, примерно на том же высотном уровне, на пологом склоне увала. Глубина скважины составила 1.8 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вариации климатических параметров и мощности СТС

Теплый период года, когда среднесуточные температуры превышают 0 °С, на Чукотском полуострове обычно длится с начала июня по конец сентября. На рис. 4 представлена динамика суммы положительных и отрицательных среднесуточных

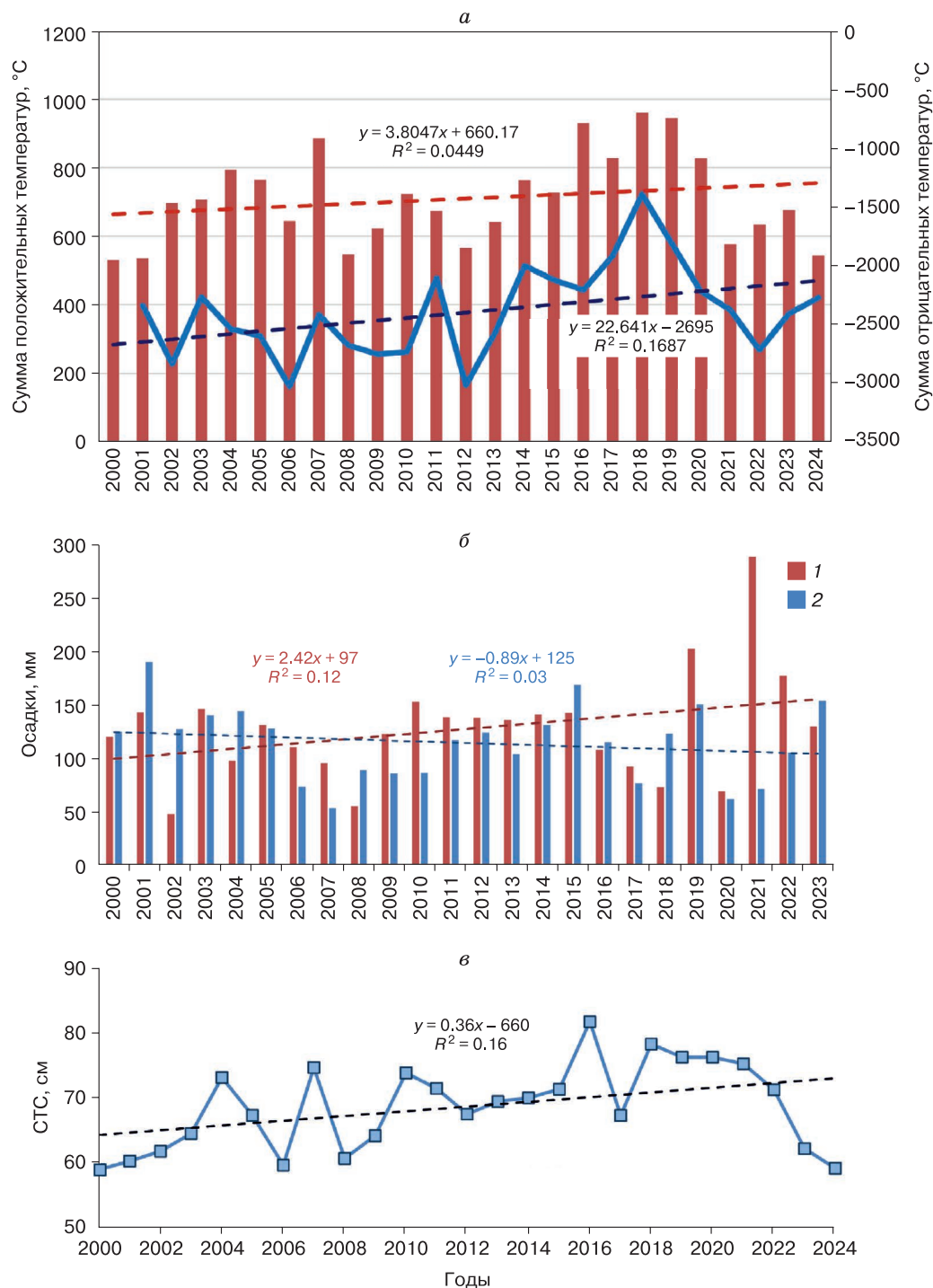


Рис. 4. Динамика суммы положительных (1) и отрицательных (2) среднесуточных температур по данным реанализа (а), количества летних и зимних осадков по метеостанции Уэлен (б) и максимальных глубин сезонного оттаивания почвы на площадке “Лаврентия” за 2000–2024 гг. (в).

температур за 2000–2024 гг. Наиболее холодным теплым периодом было лето 2000 г. (529 градусо-дней) и 2024 г. (542 градусо-дней), наиболее жаркими летними периодами отмечены 2018 и

2019 гг., когда сумма положительных среднесуточных температур достигала 960 и 944 градусо-дней соответственно. Направленного тренда в термических характеристиках летних сезонов за рассмат-

риваемый период не отмечается, однако можно выделить положительные и отрицательные аномалии летней теплообеспеченности относительно среднего значения (705 градусо-дней), имеющие длительность 4–7 лет. Периодами положительных аномалий, соответствующими более теплым летним сезонам, являются 2002–2007 и 2016–2020 гг. Периоды отрицательных аномалий, для которых отмечаются прохладные летние сезоны, относятся к 2008–2015 и 2020–2024 гг. Многолетний тренд изменения теплообеспеченности как в теплый, так и в холодный периоды слабopоложительный, однако ввиду большой межгодовой вариабельности статистически не значим ($p > 0.05$).

Количество осадков существенно варьирует из года в год. Самыми засушливыми летними сезонами были 2018 и 2020 гг., когда выпало всего 70 мм осадков. Летом 2021 г., напротив, выпало почти 300 мм. Несмотря на то что наблюдается тренд на рост количества летних осадков (см. рис. 4), его межгодовая изменчивость также не позволяет говорить о его статистической значимости.

Следует отметить, что хотя современные погодные характеристики не имеют значимых тенденций за рассматриваемый период, в более обширном временном масштабе для этой территории с 1950-х годов [Maslakov et al., 2020] наблюдается устойчивое потепление приземной температуры воздуха. Среднегодовые температуры воздуха с этого времени повышаются на 0.06–0.07 °C/год с ускорением до 0.11–0.12 °C/год в 1990-х годах (по результатам наблюдений с четырех метеостанций Чукотского полуострова и реанализа NCEP/NCAR). Эти изменения в основном обусловлены повышением зимних температур воздуха. Однако летние термические условия также существенно изменились: средняя сумма положительных среднесуточных температур за 1950–1970 гг. для метеостанции Уэлен составляет 498 °C, а за 2000–2020 гг. – 704 °C. Таким образом, с середины XX в. лето на Чукотском полуострове стало существенно теплее.

Результаты мониторинга максимальной глубины сезонного оттаивания почв и верхних горизонтов мерзлых пород почвенно-мерзлотного комплекса на площадке “Лаврентия” за 2000–2024 гг. представлены на рис. 4, в. Несмотря на в целом растущую мощность СТС, за последние четыре года (2021–2024) она резко упала до минимума за весь период наблюдений (59 см). Коэффициент детерминации (R^2) между СТС и квадратным корнем из суммы положительных среднесуточных температур составляет 0.42, что свидетельствует о влиянии других природных факторов, помимо летней температуры воздуха, на глубину сезонного оттаивания почвы. Анализ од-

новременного влияния нескольких метеопараметров представлен в виде регрессионного уравнения для площадки CALM “Лаврентия”:

$$d_{\text{л}} = 0.61\sqrt{\text{DDT}} + 0.05P_s - 0.06P_w - 0.5\sqrt{\text{DDF}} + 78.1, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.62 \quad (n = 23),$$

где d – глубина максимального сезонного оттаивания почвы, см; $\sqrt{\text{DDT}}$ и $\sqrt{\text{DDF}}$ – квадратные корни из сумм положительных и отрицательных среднесуточных температур соответственно; P_s – величина летних осадков, мм; P_w – величина зимних осадков в предшествующий сезон, мм.

Учет осадков и зимних температур воздуха позволил повысить коэффициент детерминации метеоусловий с максимальной мощностью СТС до 0.62. Вопреки общепринятым представлениям о том, что глубина сезонного оттаивания определяется метеопараметрами теплового периода, выявлено, что на межгодовую вариацию мощности СТС в значительной степени влияют зимние характеристики предшествующего сезона – количество осадков и суровость (DDF) зимнего периода. Коэффициенты при этих параметрах в уравнении (1) имеют сопоставимые величины по сравнению с летними параметрами.

Криолитологическое строение СТС и ММП

Литологический состав, криолитологическое строение и весовая влажность/льדיстость пород, полученная по кернам из скважин в районе площадки “Лаврентия”, представлены на рис. 5. Поверхностные отложения в основном представлены суглинком серым и сизым, часто с включением слабоокатанного мелкообломочного материала, с поверхности суглинок оторфован или перекрыт слоем торфа мощностью до 30 см. Весовая влажность пород определялась только в скв. 2020-06В. В пределах оттаявшей части СТС весовая влажность (W_{tot}) варьировала в пределах 30–50 %, увеличиваясь книзу до 100 %. В верхних горизонтах ММП весовая влажность пород превышала 80 %, пик значений приходился на прослой торфа в 25 см ниже подошвы СТС на момент бурения и составил 650 % (см. рис. 5).

Криолитологическое строение пород в скважинах разнообразное. Для скв. 2020-06В характерна преимущественно слоистая тонкошлифовая криотекстура. Для скважин 2019 г. неоттаявшая часть СТС характеризуется массивной криотекстурой в суглинках и слоистой криотекстурой в торфе.

Переходный слой ММП отчетливо выражен в криолитологическом строении пород, что прояв-

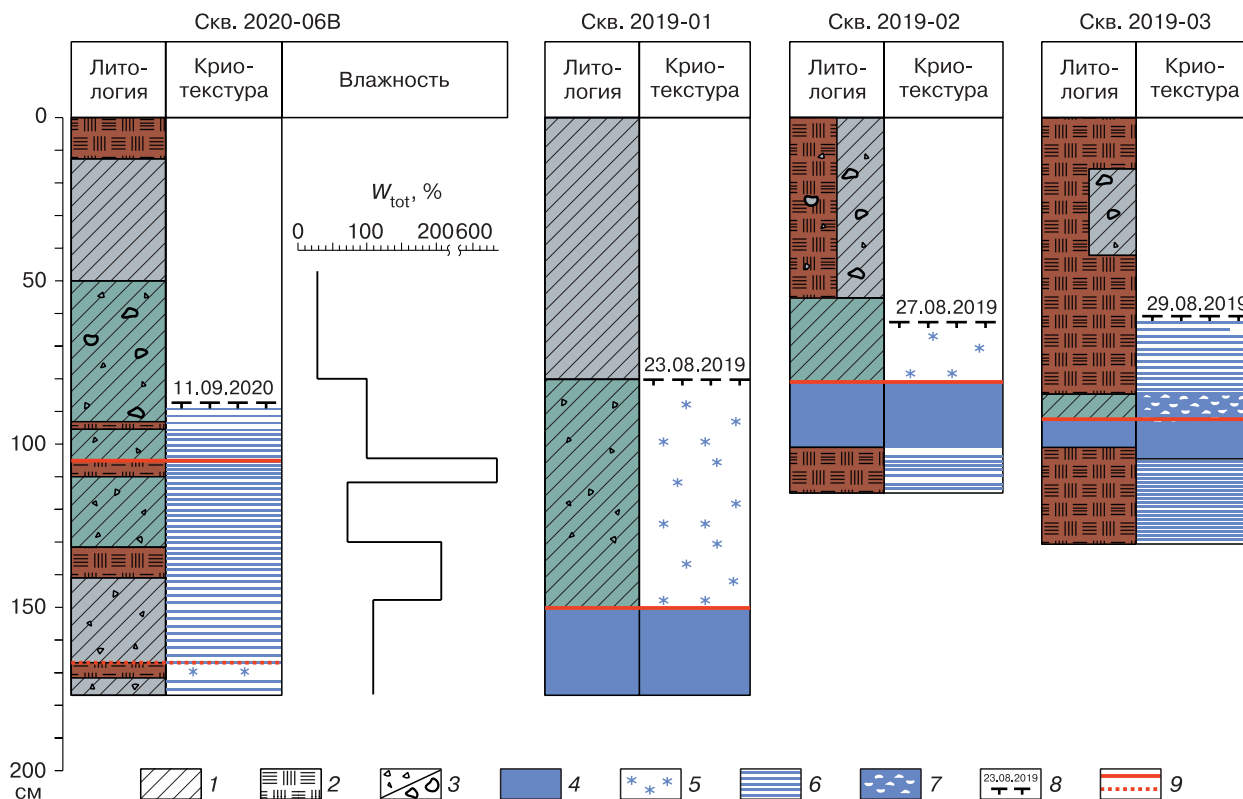


Рис. 5. Литологические колонки и криогенное строение пород вблизи площадки CALM “Лаврентия”.

1 – суглинок; 2 – торф; 3 – дресва/щебень; 4 – лед; 5–7 – криотекстуры (5 – массивная, 6 – слоистая, 7 – атакситовая); 8 – подошва CTC на момент бурения; 9 – верхняя и нижняя границы переходного слоя ММП.

ляется во всех кернах скважин. Для скв. 2020-06В он представлен в виде сильнольдистого ($W_{\text{tot}} = 70\text{--}200\%$) горизонта суглинка с прослоями сильнольдистого ($W_{\text{tot}} = 200\text{--}650\%$) торфа с частослоистой криотекстурой на отметках 100–145 см (см. рис. 5); для скважин 2019-01 и 2019-02 он представлен в виде прослоя чистого льда мощностью 25–30 см, перекрытого суглинком с массивной криотекстурой; в скв. 2019-03 переходный слой представлен сильнольдистым суглинком с атакситовой криогенной текстурой и прослоем чистого льда общей мощностью 30 см.

Вариации вертикальных движений дневной поверхности

Регулярные измерения относительной высоты марок, установленных в узлах площадки CALM “Лаврентия”, позволил подробно выявить временные и пространственные вариации высоты дневной поверхности в результате процессов осадки и пучения пород.

Среднее значение опускания дневной поверхности в результате сезонной осадки оттаивающих пород за период 2003–2024 гг. составило 2.4 см, максимальное значение было зафиксировано в

2004 г. и составило 6 см, минимальное – подъем на 1.7 см в 2021 г. Суммарное опускание дневной поверхности в пределах площадки CALM за 20 лет составило 50.5 см. Примечательно, что для узлов площадки с различной глубиной оттаивания тенденции к опусканию поверхности имели разную величину (рис. 6): при относительно глубоком сезонном протаивании (более 70 см) величина суммарного опускания поверхности достигла 80.7 см, а для узлов с неглубоким оттаиванием почвы (менее 50 см) – всего 37 см.

Сопоставление результатов разновременных геодезических съемок 2006–2023 гг. с измерениями высоты кольев относительно дневной поверхности в узлах площадки позволило определить пространственные вариации в динамике высоты дневной поверхности (рис. 7). За указанный период максимальное опускание дневной поверхности составило 69 см, минимальное – 12 см, среднее – 39 см. Характерно, что участок наибольшего опускания дневной поверхности хорошо соотносится с ложбиной стока, проходящей по площадке с юго-западного угла на восток (см. рис. 7). Участки с повышенными значениями опускания поверхности также представлены очагово в центральной

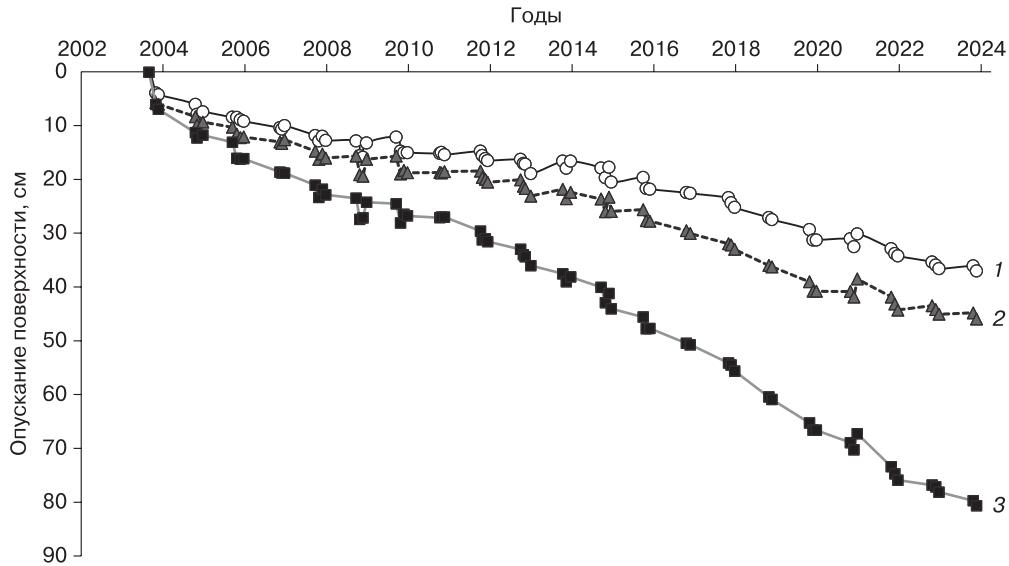


Рис. 6. Динамика вертикальных движений дневной поверхности за 2003–2024 гг. для узлов площадки CALM с различными значениями максимальной мощности сезонноталого слоя:

1 – менее 50 см; 2 – 50–70 см; 3 – более 70 см.

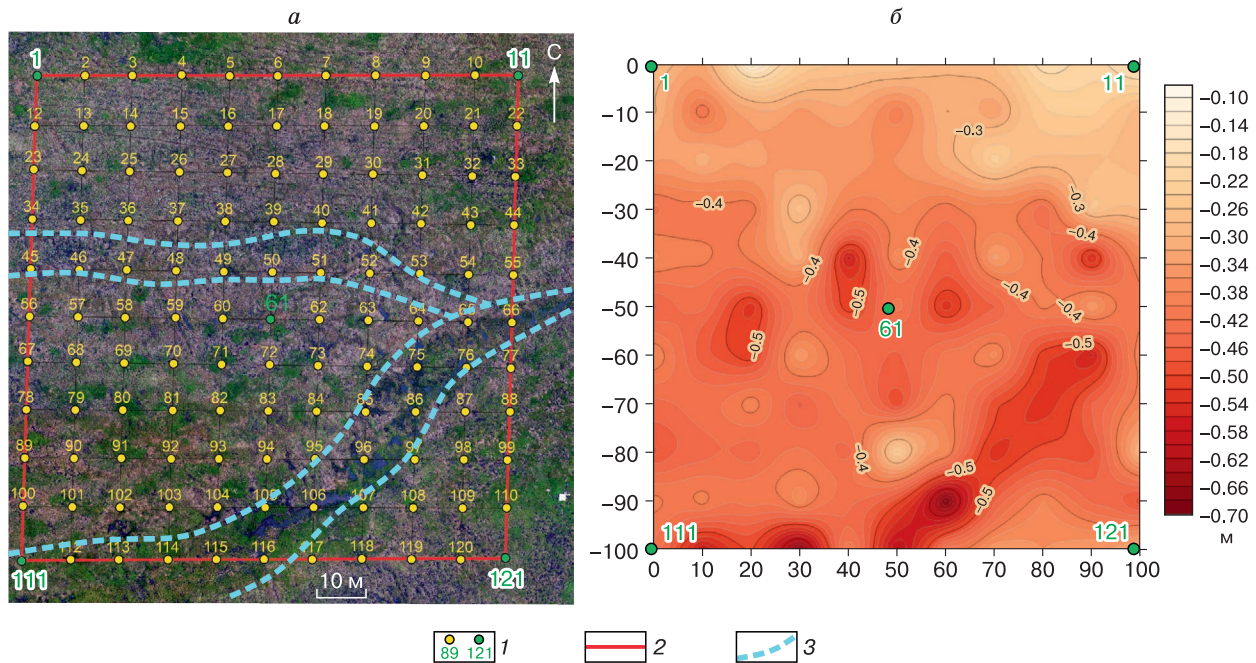


Рис. 7. Ортофотоплан площадки CALM “Лаврентия” (а), пространственные вариации опускания дневной поверхности за 2006–2023 гг. (б).

1 – узлы (реперы) площадки; 2 – граница площадки; 3 – контуры ложбин стока.

части площадки (узлы 57, 49, 62), в пределах которой расположена ложбина стока, простирающаяся с запада на восток, но гораздо слабее выраженная как в рельефе, так и в растительном покрове. Наименьшее опускание дневной поверхности зафиксировано в северо-восточном углу площадки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика скорости опускания дневной поверхности

На кривую изменения высоты дневной поверхности на протяжении 2004–2024 гг. удалось наложить полиномиальную линию тренда 4-й сте-

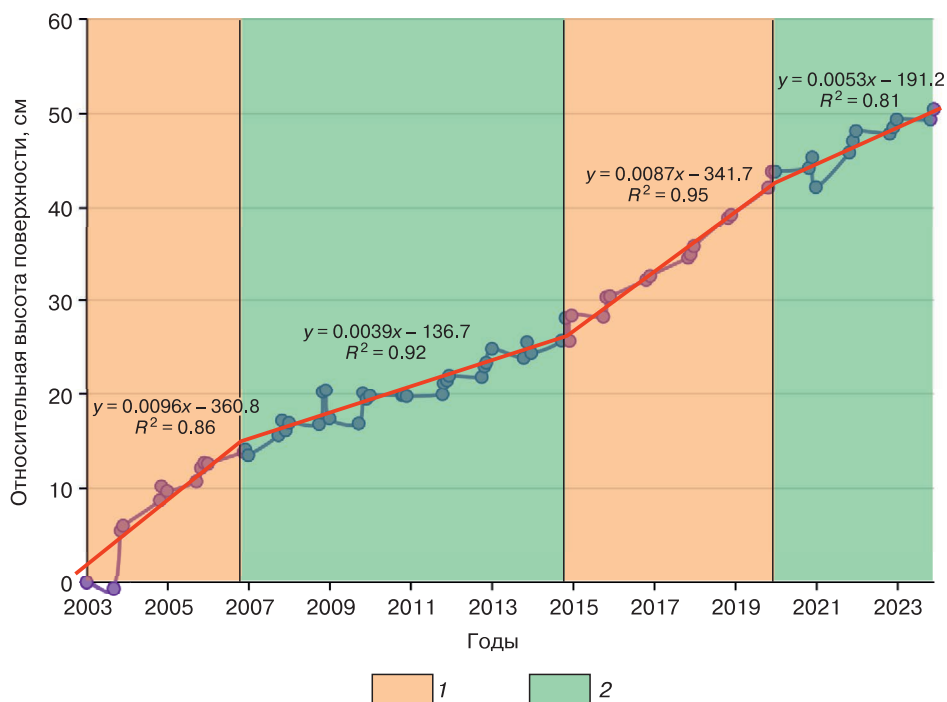


Рис. 8. Динамика изменения средней высоты поверхности в узлах площадки CALM “Лаврентия” за 2003–2024 гг.

Периоды повышенной (1) и пониженной (2) скорости опускания поверхности.

пени, на которой были выделены участки, характеризующиеся однородной (линейной) скоростью изменений (рис. 8). Полученные временные отрезки совпали с выделенными ранее периодами положительных и отрицательных аномалий сумм положительных среднесуточных температур воздуха (DDT). Таким образом, в результате многолетних полевых наблюдений за вертикальными движениями дневной поверхности на площадке CALM “Лаврентия” была выявлена зависимость скорости опускания дневной поверхности в результате осадки оттаивающих пород от летней теплообеспеченности. В периоды положительных аномалий DDT (относительно теплых летних сезонов) отмечается повышенная скорость опускания поверхности 3.2–3.5 см/год, а в периоды отрицательных аномалий (холодные летние сезоны) скорость опускания снижается до 1.4–1.9 см/год. Зависимость скорости вертикальных движений от погодных условий летнего периода отмечалась на Центральном Ямале [Bartsch *et al.*, 2019], когда аномально жаркое лето 2016 г. привело к сезонной осадке, вдвое большей по амплитуде, чем в последующие два года. Применение радарных снимков в данном исследовании позволило детально проследить внутрисезонную динамику вертикальных движений дневной поверхности для различных типов покровов, однако применение снимков Sentinel-1 в С-диапазоне не позволяет выполнять

анализ межсезонных вариаций отметок поверхности ввиду слишком слабой когерентности сигнала между теплыми сезонами.

Динамика продвижения фронта оттаивания

Сопоставление индекса оттаивания (DDT) с максимальной мощностью CTC с учетом сезонной осадки оттаивающих пород и без нее показало, что добавление величины опускания дневной поверхности в течение теплого сезона незначительно, но все же улучшает взаимосвязь между CTC и DDT (рис. 9). Более значительная роль сезонных вариаций

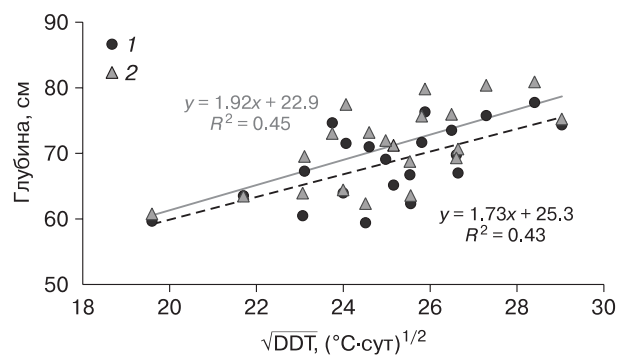


Рис. 9. Зависимость между летней теплообеспеченностью (DDT) и измеренной мощностью сезонноталого слоя без учета осадки (1) и с ее учетом (2) за период с 2004 по 2024 г. ($n = 21$).

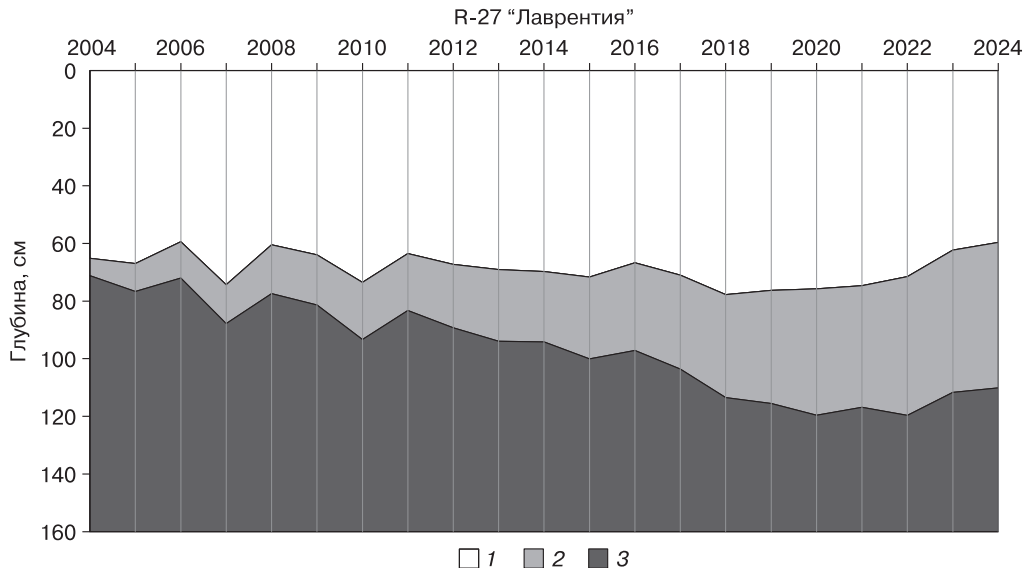


Рис. 10. Динамика мощности сезонноталого слоя и отметок кровли многолетнемерзлых пород на площадке CALM “Лаврентия” за 2004–2024 гг.

1 – сезонноталый слой; 2 – слой осадки; 3 – многолетняя мерзлота.

ций отметок поверхности была зафиксирована на стационарных площадках северо-запада Канады [O'Neill et al., 2023], где учет эффекта от осадки оттаивающих пород позволил увеличить коэффициент детерминации (R^2) на 0.19–0.28.

Наблюдения за вертикальными движениями дневной поверхности (в среднем 2.4 см/год) заметно превышают наблюдаемые тренды в росте мощности СТС, полученные по результатам измерений шупом (0.4 см/год). Последние ведутся от меняющейся дневной поверхности и не учитывают скрытый эффект осадки оттаивающих пород. Полученные сведения поднимают вопрос о выделении нового параметра, определяемого при мониторинге мощности СТС на площадках CALM в пределах распространения сильнольдистых пород. Это скорость опускания кровли ММП или скорость продвижения фронта оттаивания, которая складывается из мощности СТС и осадки оттаивающих верхних горизонтов пород почвенно-мерзлотного комплекса. Недоучет эффекта осадки для равнинных территорий криолитозоны, сложенных сильнольдистыми породами, может привести к существенному расхождению результатов мониторинга с реальной картиной и к неправильным выводам о реакции криолитозоны на климатические изменения. В данном случае, на фоне стабильности мощности СТС за 2004–2024 гг., кровля ММП заметно опустилась (рис. 10). Таким образом, отмечается недооценка реакции многолетней мерзлоты на климатические изменения лишь за счет изменения мощности СТС. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что на фоне

усиливающегося потепления климата высоких широт компенсационные механизмы, обусловленные реакцией ландшафтных условий (закустаривание тундры, рост мощности мохового покрова и т. д.), не позволяют в полной мере восстанавливать защитный (переходный) слой ММП. В периоды относительного похолодания летних периодов сокращение мощности СТС и сопровождаемый этим квазисинкриогенез не восстанавливают высотные отметки дневной поверхности в результате осадки оттаивших пород, а лишь замедляют устойчивый тренд на опускание поверхности.

Влияние природных факторов на осадку пород

Помимо отмеченной выше летней теплообеспеченности, на вертикальные движения дневной поверхности могут влиять и другие природные факторы, которые можно разделить на две большие группы: пространственные и временные.

Среди пространственных факторов в первую очередь выделяются ландшафтные условия, определяющие как литологию и влажность сезонноталого слоя, так и характер напочвенных покровов. На примере Центрального Ямала показано, что наименьшие амплитуды внутрисезонных вертикальных движений для этой территории характерны для ветровых надувов на песчаной литогенной основе и заболоченные кустарничково-осоковые тундры, в то время как поймы и участки сухой мохово-лишайниковой тундры характеризуются наибольшими значениями летней осадки поверхности [Bartsch et al., 2019]. В окрестностях станции

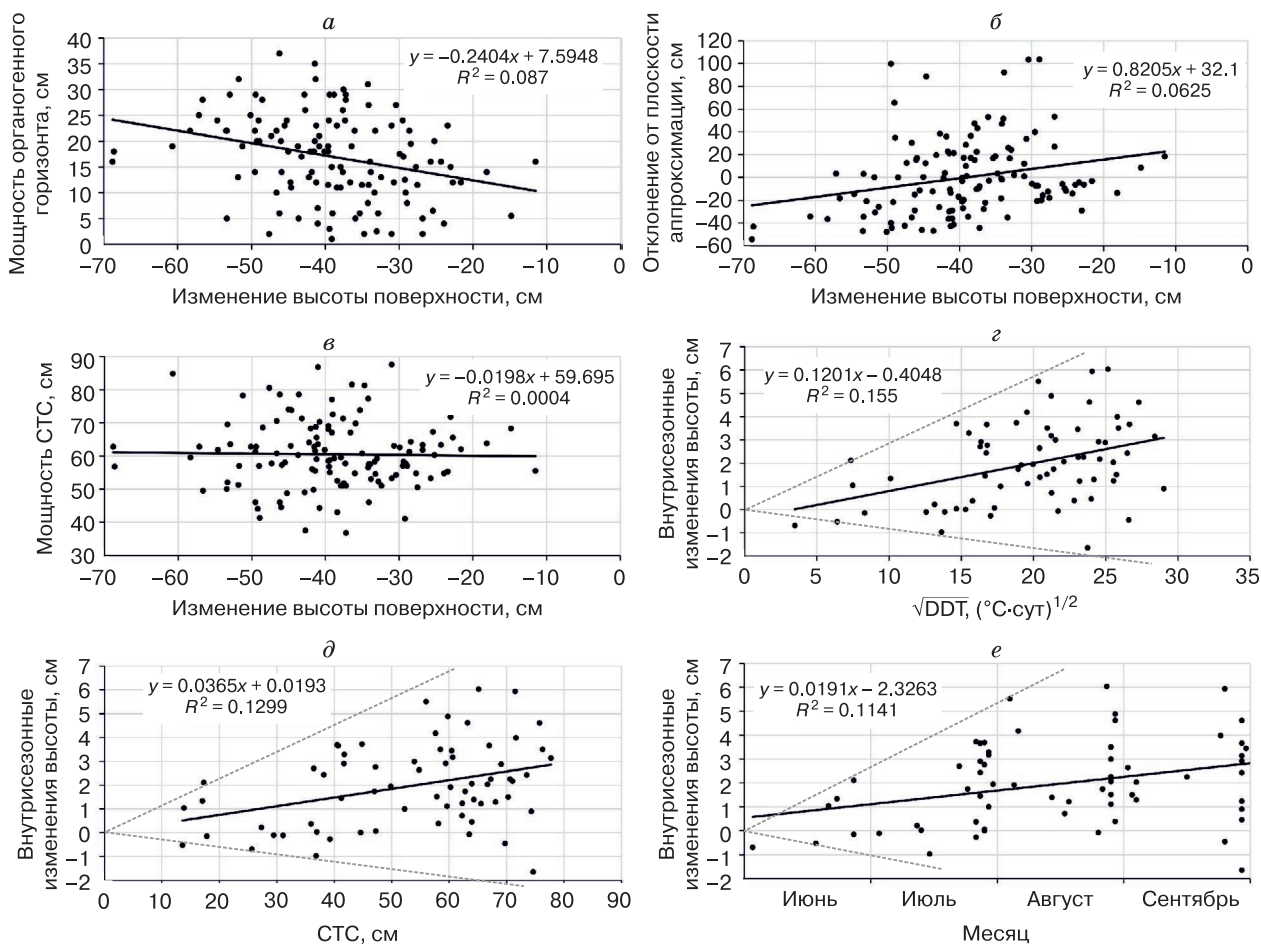


Рис. 11. Зависимости распределения вертикальных движений дневной поверхности от природных факторов в узлах площадки CALM “Лаврентия”.

a – мощности органогенного горизонта; *б* – положения в рельефе; *в* – максимальной глубины оттаивания (*a–в* – период 2006–2023 гг.); *з* – летней теплообеспеченности; *д* – внутрисезонной изменчивости мощности СТС; *е* – длительности теплового сезона. Сплошные линии – линии тренда, пунктирные – граница диапазона значений.

Тулик (Аляска, США) для дренированных участков амплитуда сезонных колебаний поверхности в среднем составляла 2 см, в то время как в увлажненных депрессиях она достигала 3 см [Chen et al., 2020]. Результаты исследований вертикальных движений поверхности на основе данных радарных спутников TerraSAR-X и Sentinel-1 в перигляциальной области острова Западный Шпицберген (Норвегия), совмещенные с геоморфологическими полевыми исследованиями, показали отчетливую зависимость сезонных вертикальных движений поверхности от различных форм рельефа и типов отложений [Rouyet et al., 2019].

Для площадки CALM “Лаврентия” были выделены три пространственных фактора, которые могут оказывать влияние на величину вертикальных смещений поверхности в каждом узле площадки: мощность поверхностного органогенного горизонта, среднееголетняя максимальная глу-

бина оттаивания и положение узла в рельефе (рис. 11, *a–в*). Мощность органогенного горизонта почвы определялась для каждого узла площадки ландшафтным щупом с точностью до 1 см [Zamolodchikov et al., 2004]. Максимальная глубина оттаивания осреднялась для каждого узла площадки за период 2000–2024 гг. Положение узла в рельефе определялось как отклонение от плоскости аппроксимации, полученной по уравнению

$$AX + BY + Z = 0, \quad (2)$$

где X, Y – координаты каждого из 121 узла площадки (зависимые величины); Z – высота узлов (независимая величина).

Положительное значение отклонения от плоскости свидетельствует о положении узла на возвышенности, отрицательное – о положении в депрессии. Результаты анализа (см. рис. 11, *a–в*) показали, что несмотря на наблюдаемые частные

закономерности (повышенные скорости опускания в ложбинах стока), в регулярной сетке узлов, расставленных через каждые 10 метров, влияние выделенных пространственных факторов крайне незначительно ($R^2 < 0.1$).

Сезонными факторами, оказывающими влияние на вертикальные движения поверхности в криолитозоне, могут служить как метеопараметры, так и изменение мощности СТС во времени. Например, ежемесячное нивелирование на ключевом участке вблизи Цинхай-Тибетской железной дороги (КНР) показало четыре отчетливых этапа в годовом цикле вариаций отметок дневной поверхности: летнюю осадку (июнь–август), период стабильных отметок (сентябрь), осенне-зимнее пучение (октябрь–январь) и зимне-весеннюю стабильность (февраль–май) [Chen et al., 2020].

Для площадки “Лаврентия” были выделены три временных параметра (см. рис. 11, *z–e*): квадратный корень из суммы положительных среднесуточных температур (индекс DDT), средняя по площадке глубина сезонного оттаивания в течение теплого сезона, юлианский день года. Индекс DDT характеризует количество тепла, получаемого почвой из атмосферы, а его квадратный корень хорошо согласуется (при прочих равных условиях) с глубиной сезонного оттаивания почвы.

Однако ни СТС, ни $\sqrt{DDT}$ не демонстрируют значимой корреляции со средней по площадке осадкой почвы. Пунктирными линиями показан расширяющийся по мере развития теплого сезона коридор значений осадки, соответствующий определенным значениям рассматриваемых параметров. Та же картина характерна и для юлианских дней (см. рис. 11, *e*) – с 1 июня (153-й день) до 25 сентября (270-й день) диапазон значений зафиксированной средней осадки растет.

Полученная картина распределений демонстрирует, что величина сезонной осадки почвы на микро- и мезоландшафтном уровнях зависит не столько от мощности СТС или погодных условий летнего сезона, сколько от комбинации этих и других, не учтенных в данном исследовании условий. Такими условиями могут быть изменяющиеся год от года сроки начала и окончания теплого сезона, погодные условия осенне-зимнего промерзания пород СТС и положение фронта максимального оттаивания за предыдущий летний сезон.

Роль переходного слоя ММП в эволюции криогенного рельефа

Проведенные расчеты влияния выбранных пространственных и временных факторов на вариации отметок дневной поверхности на микро- и мезоландшафтном уровнях показали их незначительную роль в распределении вертикальных дви-

жений в пространстве и их проявление во времени. Вероятно, существует неявный фактор, оказывающий существенное воздействие на долгосрочную эволюцию рельефа кровли ММП и дневной поверхности. Этим фактором может быть переходный слой ММП, который залегает плащеобразно ниже среднемноголетнего слоя сезонного оттаивания. По-видимому, пространственная вариация амплитуды вертикальных движений в масштабе площадки CALM зависит в большей степени от криофациальных условий переходного слоя многолетней мерзлоты, которые могут не отражаться в ландшафтных условиях поверхности. Сезонные вариации летней осадки также определяются условиями промерзания нижней части СТС и формирования переходного слоя ММП: предзимняя влажность СТС определяет амплитуду осенне-зимнего пучения и льдистость пород СТС. Немаловажную роль играет состояние самого переходного слоя: успел ли он сформироваться в нижней части СТС за несколько предыдущих холодных периодов в виде сильнольдистого (и подверженного сильной осадке при оттаивании) горизонта или полностью оттаял в прошлый год, сформировав слой с массивной криотекстурой (например, в скв. 2019-01).

Исследование переходного слоя в окрестностях площадки CALM “Лаврентия” (в пределах приморских равнин Восточной Чукотки) показало, что его параметры могут сильно различаться в зависимости от литологии и генезиса отложений, в которых он сформирован [Maslakov et al., 2021]. Мощность переходного слоя варьирует от 0.1 до 1.2 м, весовая влажность мерзлых пород может достигать 1000 %, а криотекстуры могут быть как тонкошлировыми частослоистыми, так и атакситовыми, сетчатыми и линзовидными. Пестрая фациальная изменчивость переходного слоя продемонстрирована на относительно компактном участке тундры вокруг площадки “Лаврентия” (см. рис. 5).

Таким образом, несмотря на выявленные пространственные и временные вариации осадки оттаивающих пород в пределах площадки “Лаврентия”, статистически значимых факторов, определяющих эти вариации, обнаружено не было. Это позволяет выдвинуть гипотезу, что осадка оттаивающих пород, происходящая на фоне прогрессирующего потепления климата, на микро- и мезоландшафтном уровнях определяется параметрами переходного слоя, подстилающего слой сезонного оттаивания пород. Криофациальное разнообразие этого слоя определяется не столько современными ландшафтными условиями поверхности, сколько историей их эволюции в голоцене, а также условиями дренирования, литологией и генезисом подстилающих мерзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетних наблюдений за динамикой глубины сезонного оттаивания почвы и вертикальных движений дневной поверхности в пределах мониторинговой площадки CALM “Лаврентия” были определены пространственно-временные особенности деградации верхней части толщи многолетней мерзлоты. Накопленный фактический материал позволил провести статистический анализ влияния различных природных факторов на амплитуду осадки оттаивающих пород. Выполненное исследование позволяет сделать несколько выводов.

1. На фоне наблюдаемого потепления климата Арктики в пределах мониторинговой площадки CALM “Лаврентия”, отражающей природные условия увалистой водно-ледниковой равнины Восточной Чукотки, выявлено опускание дневной поверхности без формирования выраженных термокарстовых форм рельефа. Наиболее четко этот процесс проявился в углублении ложбин стока в пределах площадки. Скорость осадки оттаивающих пород, измеренная за 2004–2024 гг., увеличивается до 3.2–3.5 см/год в периоды относительно теплых летних сезонов и сокращается до 1.4–1.9 см/год в периоды прохладных летних сезонов. Вариации указанных величин превышают почти на порядок наблюдаемый тренд роста глубины сезонного оттаивания почвы (0.4 см/год), что свидетельствует о значительной недооценке темпов деградации мерзлых пород в этом регионе. Полученные результаты заставляют пересмотреть данные мониторинга сезонноталого слоя на других площадках CALM, расположенных на сильнольдистых отложениях, и разработать комплекс дополнительных исследований по учету скрытого эффекта от осадки оттаивающих пород.

2. Попытки выявить природные факторы, определяющие пространственно-временные вариации внутрисезонных колебаний дневной поверхности, обнаружили статистически незначимые взаимосвязи с выбранными характеристиками (положение в рельефе, мощность органогенного горизонта, глубина сезонного оттаивания почвы, день года). Это позволяет выдвинуть гипотезу, что в условиях прогрессирующего потепления климата необратимая осадка оттаивающих пород затрагивает подстилающие СТС мерзлые породы, от свойств которых и зависят пространственно-временные вариации вертикальных движений поверхности.

3. Результаты неглубокого бурения в окрестностях площадки CALM “Лаврентия” подтвердили наличие сильнольдистого переходного слоя ММП, за счет которого происходит наблюдаемое опускание дневной поверхности. Его мощность в некоторых местах может достигать 1.2 м, что со-

храняет потенциал к дальнейшему опусканию дневной поверхности и возможному формированию термокарстовых форм рельефа при дальнейшем потеплении климата. Выявление фациальных закономерностей распространения переходного слоя (и в целом – строения почвенно-мерзлотного комплекса) в различных ландшафтно-мерзлотных обстановках является целью дальнейших исследований для точного прогнозирования эволюции криогенных ландшафтов равнинных территорий криолитозоны Северного полушария.

Выявление пространственных закономерностей и ведущих факторов, определяющих параметры переходного слоя, представляется дальнейшим направлением исследований. Наряду с расширением спектра изучаемых природно-территориальных комплексов это позволит дать прогнозную оценку эволюции криогенных ландшафтов и рельефа для равнинных территорий криолитозоны в контексте продолжающегося потепления климата.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 25-17-00010).

Литература

- Баранов И.Я., Баулин В.В.** Влияние многолетнего промерзания на формирование геоморфологических уровней // Мерзлотные исслед., 1964, вып. IV, с. 285–291.
- Каневский М.З.** Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений северной Якутии: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2004, 23 с.
- Коницев В.Н.** Внутриландшафтная реакция мерзлотных условий на современные изменения климата // Науч. альманах, 2003, № 1, с. 129–144.
- Коницев В.Н.** Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2009, № 4, с. 10–20.
- Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.** Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 20–30.
- Маслаков А.А., Замолдчиков Д.Г., Зеленский Г.М.** Эволюция микрорельефа на площадке CALM R-27 “Лаврентия” (Восточная Чукотка) на фоне современных климатических изменений // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 2024, № 11, с. 561–570.
- Маслаков А.А., Комова Н.Н.** Деградация льдистых отложений приморских равнин Восточной Чукотки при современных климатических условиях // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 2019, № 6, с. 113–117.
- Романовский Н.Н.** К теории термокарста // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 1977, № 1, с. 65–71.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 36 с.
- Свод правил** СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах (актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88). М., Госстрой России, 2020, 135 с.

Шып Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.

Bartsch A., Leibman M., Strozzi T. et al. Seasonal progression of ground displacement identified with satellite radar interferometry and the impact of unusually warm conditions on permafrost at the Yamal Peninsula in 2016 // *Remote Sens.*, 2019, vol. 16, No. 11, p. 1–25.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at global scale // *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1–11.

Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The circumpolar active layer monitoring (CALM) program: Research designs and initial results // *Polar Geography*, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.

Chen J., Wu Y., O'Connor M., Cardenas M.B. et al. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR // *Remote Sens. Environ.*, 2020, No. 248, p. 1–12.

Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Streletskiy D.A. Active layer dynamics near Norilsk, Taimyr peninsula, Russia // *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, No. 4, p. 55–66.

Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS), 2023 (accessed: 12.11.2024).

Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North // *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 203–216.

Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: The evidence of Late Pleistocene–Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils // *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 3, No. 34, p. 317–330.

Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M. et al. The transient layer of permafrost of the Eastern Chukotka coastal plains, NE Russia // *Proc. of the 26th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions* (Moscow, Russia, 15–18 June 2021). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2021, p. 1–8.

Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al. Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability // *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, No. 3, p. 49–56.

Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D. et al. Permafrost degradation within Eastern Chukotka CALM sites in the 21st century based on CMIP5 climate models // *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 5, p. 232.

Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arct. Alp. Res.*, 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.

Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. et al. Long-term circumpolar active layer monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra // *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 167–185.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming // *Geosciences*, 2023, vol. 13, No. 5, p. 1–13.

O'Neill H.B., Smith S.L., Burn C.R. et al. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in Northwest Canada // *J. Geophys. Res., Earth Surface*, 2023, vol. 128, No. 8, p. 1–16.

Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Commun. Earth Environ.*, 2022, No. 3, Art. 168.

Rouyet L., Lauknes T.R., Christiansen H.H. et al. Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR // *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 231, Art. 111236.

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 24, p. 6356–6361.

Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science // *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, No. 1, p. 5–17.

Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G. et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere—review and perspectives // *Environ. Res. Lett.*, 2025, vol. 20, No. 1, p. 1–16.

Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the western Russian Arctic // *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 154, No. 4, 045001.

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.

Zhang J., Liu L., Hu Y. Global Positioning System interferometric reflectometry (GPS-IR) measurements of ground surface elevation changes in permafrost areas in northern Canada // *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, No. 6, p. 1875–1888.

Zhang Z., Lin H., Wang M. et al. A review of satellite synthetic aperture radar interferometry applications in permafrost regions: Current status, challenges, and trends // *IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine*, 2022, vol. 10, No. 3, p. 93–114.

Zwieback S., Liu L., Rouyet L. et al. Advances in InSAR analysis of permafrost terrain // *Permafr. Periglac. Process.*, 2024, vol. 35, No. 4, p. 544–556.

URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 06.03.2025).

References

Baranov I.Ya., Baulin V.V. The influence of long-term freezing on the formation of geomorphological levels. *Merzlotnyye issledovaniya* [Permafrost studies], 1964, iss. IV, p. 285–291 (in Russian).

Kanevsky M.Z. Regularities of formation of cryogenic structure of Quaternary deposits of northern Yakutia: Abstract of Cand. Geol.-Min. Sci. [Abstract of the dissertation of the candidate of geological and mineralogical sciences]. Moscow, 2004, 23 p. (in Russian).

Konishchev V.N. Intra-landscape response of permafrost conditions to modern climate changes. *Nauchnyi almanakh* [Scientific almanac], 2003, No. 1, p. 129–144 (in Russian).

Konishchev V.N. Permafrost response to global warming. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography], 2009, No. 4, p. 10–20 (in Russian).

Mazhitova G.G., Kaverin D.A. Thaw depth dynamics and soil surface subsidence at a Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site, the European North of Russia. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], 2007, vol. XI, No. 4, p. 20–30 (in Russian).

Maslakov A.A., Zamolodchikov D.G., Zelensky G.M. Evolution of microrelief at the CALM R-27 “Lavrentia” site (Eastern Chukotka) against the background of modern climate change. In: *Rel'yef i chetvertichnyye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia], 2024, No. 11, p. 561–570 (in Russian).

- Maslakov A.A., Komova N.N. Degradation of ice deposits of the coastal plains of Eastern Chukotka under modern climatic conditions. In: *Rel'yef i chetvertichnyye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii* [Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West of Russia], 2019, No. 6, p. 113–117 (in Russian).
- Romanovsky N.N. Towards the theory of thermokarst. *Vestnik MGU. Ser. 4. Geologiya* [Bulletin of Moscow State University. Ser. 4. Geology], 1977, No. 1, p. 65–71 (in Russian).
- Romanovsky N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1993, 36 p. (in Russian).
- Svod pravil SP 25.13330.2020. *Osnovaniya i fundamenty na vechnomorzlykh gruntakh (aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.04-88)* [Foundations and bases on permafrost soils (updated version of SNiP 2.02.04-88)]. Moscow, Gosstroy of Russia, 2020, 135 p. (in Russian).
- Shur Yu.L. *Verkhniy gorizont merzlukh porod i termokarst* [Upper horizon of frozen rocks and thermokarst]. Novosibirsk, Nauka, 1988, 213 p. (in Russian).
- Bartsch A., Leibman M., Strozzi T. et al. Seasonal progression of ground displacement identified with satellite radar interferometry and the impact of unusually warm conditions on permafrost at the Yamal Peninsula in 2016. *Remote Sens.*, 2019, vol. 16, No. 11, p. 1–25.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at global scale. *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, No. 1, p. 1–11.
- Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.
- Chen J., Wu Y., O'Connor M. et al. Active layer freeze-thaw and water storage dynamics in permafrost environments inferred from InSAR. *Remote Sens. Environ.*, 2020, No. 248, p. 1–12.
- Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Streletskiy D.A. Active layer dynamics near Norilsk, Taimyr peninsula, Russia. *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, vol. 14, No. 4, p. 55–66.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S), Climate Data Store (CDS), 2023 (accessed: 12.11.2024).
- Kaverin D., Malkova G., Zamolodchikov D. et al. Long-term active layer monitoring at CALM sites in the Russian European North. *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 203–216.
- Lupachev A.V., Gubin S.V. Soil-cryogenic complex: The evidence of Late Pleistocene–Holocene coevolution of permafrost and cryogenic soils. *Permafr. Periglac. Process.*, 2023, vol. 3, No. 34, p. 317–330.
- Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M. et al. The transient layer of permafrost of the Eastern Chukotka coastal plains, NE Russia. In: *Proc. of the 26th Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions* (Moscow, Russia, 15–18 June 2021). Moscow, Lomonosov Moscow State University, 2021, p. 1–8. – <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-049.pdf>
- Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N. et al. Community ice cellars in eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability. *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, No. 3, p. 49–56.
- Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D. et al. Permafrost degradation within Eastern Chukotka CALM sites in the 21st century based on CMIP5 climate models. *Geosciences*, 2019, vol. 9, No. 5, p. 232.
- Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arct. Alp. Res.*, 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.
- Nyland K.E., Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A. et al. Long-term Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra. *Polar Geography*, 2021, vol. 44, No. 3, p. 167–185.
- Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A. et al. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming. *Geosciences*, 2023, vol. 13, No. 5, p. 1–13.
- O'Neill H.B., Smith S.L., Burn C.R. et al. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in Northwest Canada. *J. Geophys. Res.*, 2023, vol. 128, No. 8, p. 1–16.
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun. Earth Environ.*, 2022, No. 3, Art. 168.
- Rouyet L., Lauknes T.R., Christiansen H.H. et al. Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR. *Remote Sens. Environ.*, 2019, vol. 231, Art. 111236.
- Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, No. 24, p. 6356–6361.
- Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafr. Periglac. Process.*, 2005, vol. 16, No. 1, p. 5–17.
- Streletskiy D.A., Maslakov A., Grosse G. et al. Thawing permafrost is subsiding in the Northern Hemisphere-review and perspectives. *Environ. Res. Lett.*, 2025, vol. 20, No. 1, p. 1–16.
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G. et al. Permafrost degradation in the western Russian Arctic. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 154, No. 4, 045001.
- 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.
- Zhang J., Liu L., Hu Y. Global Positioning System interferometric reflectometry (GPS-IR) measurements of ground surface elevation changes in permafrost areas in northern Canada. *The Cryosphere*, 2020, vol. 14, No. 6, p. 1875–1888.
- Zhang Z., Lin H., Wang M. et al. A review of satellite synthetic aperture radar interferometry applications in permafrost regions: Current status, challenges, and trends. *IEEE Geosci. Remote Sens. Magazine*, 2022, vol. 10, No. 3, p. 93–114.
- Zwieback S., Liu L., Rouyet L. et al. Advances in InSAR analysis of permafrost terrain. *Permafr. Periglac. Process.*, 2024, vol. 35, No. 4, p. 544–556.
- URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (last visited: 06.03.2025).

*Поступила в редакцию 5 июня 2024 г.,
после доработки – 13 мая 2025 г.,
принята к публикации 22 августа 2025 г.*