

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-561-570



ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА НА ПЛОЩАДКЕ CALM R-27 «ЛАВРЕНТИЯ» (ВОСТОЧНАЯ ЧУКОТКА) НА ФОНЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

✉ Маслаков А.А.¹, Замолотчиков Д.Г.², Зеленский Г.М.³

¹ Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Факультет географии и геоинформационных технологий НИУ ВШЭ, Москва, Россия

³ Некоммерческое партнёрство «Чукотская группа поддержки научных исследований», Лаврентия,
Чукотский АО, Россия

✉ alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Мониторинговые исследования за параметрами сезонноталого слоя проводятся на территории Восточной Чукотки в рамках программы CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) с 2000 года. Помимо измерения мощности сезонноталого слоя почвы в пределах 2 площадок CALM, также ежегодно на площадке R-27 «Лаврентия» определяется величина сезонной осадки почвы при оттаивании, влажность приповерхностного слоя почвы, а также проективное покрытие растительного покрова. Определение осадки поверхности проводится путём измерения в течение летнего сезона относительной высоты вмороженных в многолетнюю мерзлоту кольев, расположенных в узлах площадки. Проективное покрытие растительности определяется при помощи измерительных рамок раз в год, на пике вегетационного периода. Исследования выявили, что за 20 лет в результате оттаивания высокольдистого переходного слоя поверхность площадки CALM «Лаврентия» опустилась на несколько десятков сантиметров. За это время произошло углубление дренажных ложбин. Изменение рельефа повлекло за собой изменение условий увлажнения и, следовательно, видового состава растительности. Проведённые исследования позволяют наметить траектории дальнейшей эволюции рельефа и растительности равнинной криолитозоны на фоне продолжения потепления климата в Арктике и усиления антропогенной нагрузки на экосистемы.

Ключевые слова: Чукотка, многолетнемёрзлые породы, сезонноталый слой, переходный слой, мониторинг

Введение. Современные климатические изменения наблюдаются повсеместно: с 1850 по 2020 гг. рост приповерхностной температуры воздуха в среднем по Земному шару составил 0,84-1,10°C, а к концу XXI в, согласно проекциям ансамбля моделей CMIP6, она может подняться ещё на 1,0-5,7°C в зависимости от климатического сценария [IPCC, 2023]. При этом приземная температура воздуха в Арктике растёт почти в четыре раза быстрее, чем в среднем по Земному шару [Rantanen et al., 2022]. Потепление Арктики ведёт к изменению параметров теплообмена атмосферы с многолетнемёрзлыми породами (ММП) в криолитозоне, что, в свою очередь, проявляется в увеличении мощности сезонноталого слоя (СТС) и температуры пород [например, Biskaborn et al., 2019; Kaverin et al., 2019; Vasiliev et al., 2020]. Рост теплообеспеченности северных территорий ведёт, с одной стороны, к повсеместному распространению термокарстовых и термоэрозионных форм рельефа [Лейбман, Кузяков, 2007; Kokelj & Jorgenson, 2013; Nitze et al., 2018], с другой – к изменению структуры растительности, в частности, к смещению фенофаз [Москаленко, 2009; Анисимов и др., 2015] и увеличению их биопродуктивности с за счёт выдвигания северной границы леса [Тишков и др., 2021; Liu et al., 2024].

Вместе с тем, в регионах сплошного распространения многолетней мерзлоты высокой льдистости – северный склон Аляски [Nyland et al., 2021], северо-запад Канады [O'Neill et al., 2023], западный Ямал [Oblogov et al., 2023] – мониторинговыми исследованиями отмечается отсутствие трендов и даже снижение глубины сезонного оттаивания почвы в последние десятилетия. Отсутствие реакции СТС на климатический форсинг можно объяснить тем, что на подавляющем большинстве площадок мониторинга, обустроенных по протоколу CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) [Brown et al., 2000], глубина

сезонного оттаивания почвы измеряется мерзлотным щупом от дневной поверхности до кровли мёрзлых пород. Прогрессирующее потепление климата приводит к оттаиванию высокольдистых отложений, подстилающих сезонноталый слой (т.н. переходный слой), что ведёт к опусканию дневной поверхности в тёплый период. Осенью процесс промерзания отложений СТС сопровождается их пучением и поднятием дневной поверхности, однако величина осеннего пучения не всегда компенсирует летнюю осадку поверхности, что в долгосрочной перспективе ведёт к постепенному опусканию как кровли ММП, так и дневной поверхности [O'Neill et al., 2023]. При этом мощность самого сезонноталого слоя может практически не изменяться.

Наряду с другими районами арктической криолитозоны, мёрзлые породы Восточной Чукотки также демонстрируют признаки деградации [Maslakov et al., 2019]. Мониторинг параметров СТС, а также наблюдения за растительным покровом проводятся здесь в пределах 2 площадок CALM – R-41 Лорино и R-27 Лаврентия. На последней измерения ведутся более 20 лет. Полученный массив информации позволяет выявить долгосрочные тренды изменения мерзлотных условий и растительного покрова. Помимо этого, на площадке R-27 Лаврентия с 2003 года ведутся наблюдения за сезонными и межгодовыми вариациями дневной поверхности, что позволяет также провести оценку эволюции рельефа площадки и выявить закономерности его развития для данных природных условий.

Район исследований. Территория Восточной Чукотки глубоко выдаётся в море и омывается Чукотским морем с севера и Беринговым морем с востока и юга. Рельеф представлен сглаженным низкогорьем Мезозойской складчатости, обрамлённым узкой полосой приморских равнин ледникового, морского и водно-ледникового генезиса [Гасанов, 1969; Иванов, 1986]. Многолетняя мерзлота имеет сплошное распространение, её температура варьирует от $-1..-2^{\circ}\text{C}$ в прибрежных районах до $-5..-6^{\circ}\text{C}$ в горных областях [Колесников, Плехт, 1989]. В ландшафтном плане эта территория представляет собой область типичных кочкарных тундр на равнинах и горных тундр на отметках 150-200 м н.у.м. и выше [Maslakov et al., 2021b].

Мониторинговые исследования за сезонным протаиванием почвы здесь были организованы в рамках программы CALM в 2000 году. Впоследствии стандартные измерения мощности СТС были дополнены измерениями осадки поверхности почвы, микрометеорологическими наблюдениями и геоботаническими исследованиями. В последние годы на полигоне «Приморские равнины Восточной Чукотки» (рис. 1) проводятся специализированные исследования подземных льдов [например, Vasil'chuk et al., 2021], ландшафтных условий [Маслаков и др., 2020; Maslakov et al., 2021b] и переходного слоя многолетней мерзлоты [Maslakov et al., 2021a].

В данной работе внимание сфокусировано на данных, полученных в результате многолетних мониторинговых измерений в пределах площадки CALM R-27 «Лаврентия», расположенной в 1,5 км к северо-западу от с. Лаврентия на склоне увала водно-ледниковой равнины. Площадка имеет высоту около 80 м н.у.м., её поверхность ровная, осложнена ложбинами стока глубиной до 50 см и имеет уклон $2-3^{\circ}$ на восток.

Материалы и методы. Геодезические измерения. Помимо стандартного набора параметров (мощность СТС, влажность приповерхностного слоя почвы), определяемых на площадках CALM ежегодно, для площадки R-27 Лаврентия каждые несколько лет проводились геодезические измерения поверхности (нивелирование, тахеометрическая съёмка). Измерения проводились в 2006, 2012, 2018 и 2023 гг. в условной системе координат и высот за исключением 2012 года, когда привязка производилась к реперной сети автодороги «Лаврентия-Лорино», проходящей в 700 м к юго-западу от площадки.

В виду того, что все геодезические измерения в пределах площадки проводились с привязкой к разным реперным точкам (как в абсолютной, так и относительной системе координат), возможности провести прямые сопоставления высот узлов площадки нет. Тем не менее, полученные распределения высот узлов площадки удалось сопоставить

косвенным способом. Среднее значение высоты всех точек площадки 2012 года сравнивалось со средней высотой точек 2006, 2018 и 2023 гг. Полученная разница была поправкой на высоту поверхности (Δh). Поправка на изменение дневной поверхности в результате сезонной осадки/пучения пород ($\Delta \eta$) рассчитывалась как сумма изменений высоты вмороженных кольев за рассматриваемые отрезки времени (см. далее). Таким образом, результаты геодезических измерений последовательно приводились к средней высоте поверхности на 2012 год с поправкой на $\Delta \eta$ за периоды наблюдений.

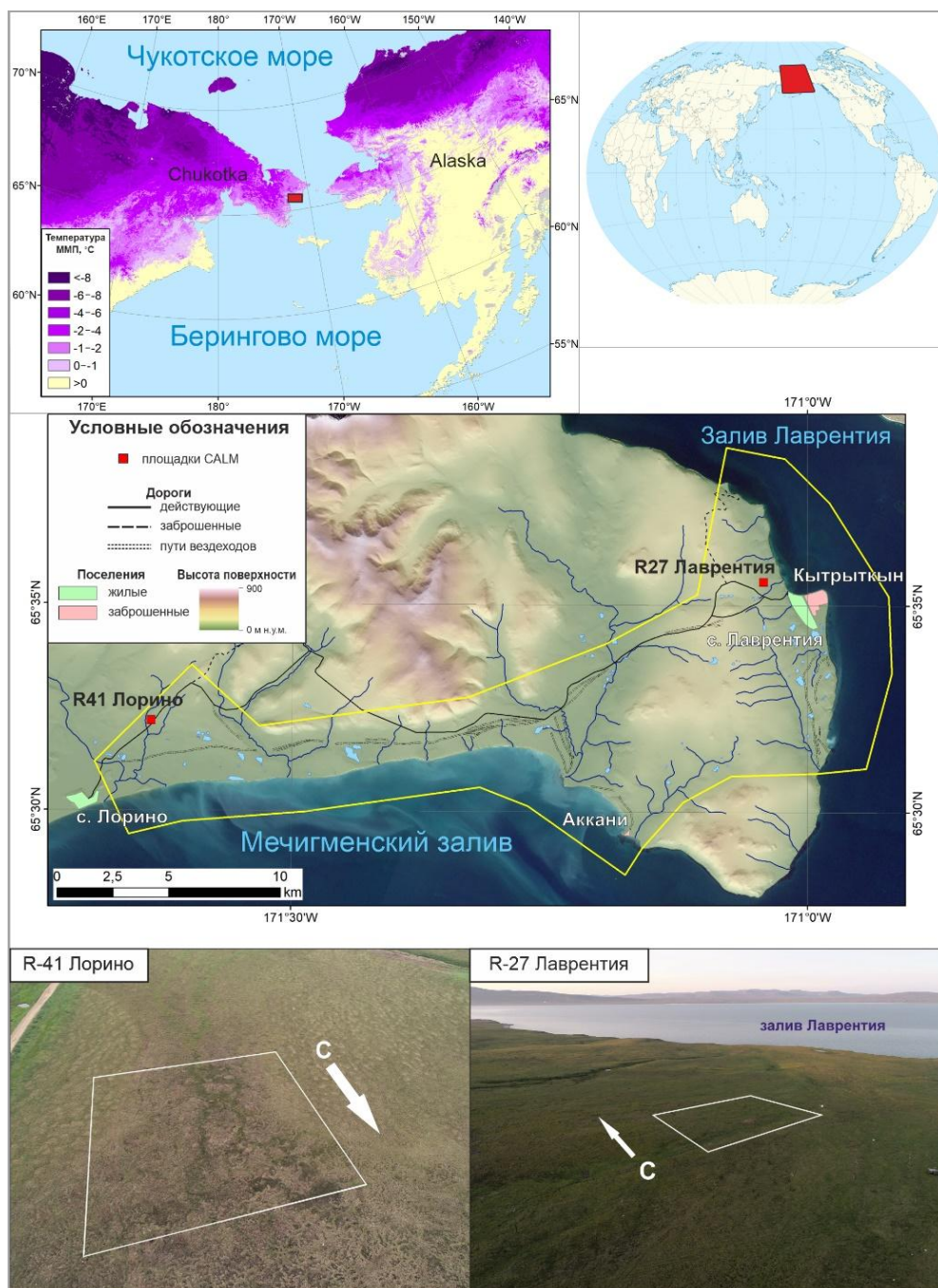


Рис. 1. Район исследований. Полигон «Приморские равнины Восточной Чукотки» выделен жёлтым контуром.

Аэрофотосъёмка

При помощи малого БПЛА (DJI Mini 3 Pro) на площадке Лаврентия 24 июля была выполнена аэрофотосъёмка. Съёмка проводилась в ручном режиме при хорошем освещении, в нади́р с высоты 50 м с продольным перекрытием снимков не менее 70% и

боковым не менее 50% при минимальном отклонении камеры от линии надира. Для дешифрирования границ полигона на поверхности площадок были установлены маркеры (опознавательные знаки). В результате полевых работ для площадки CALM Лаврентия получено 28 снимков с разрешением 3 см.

Составление цифровой модели местности и ортофотоплана

Для обработки полученных с дрона снимков и построения цифровых моделей местности и ортофотопланов использовалось ПО Agisoft Metashape Professional, позволяющее производить всю требуемую фотограмметрическую обработку. При помощи инструмента «Align photos» строилось разреженное облако точек за счёт стереоэффекта и вычисления пикселей, соответствующих одному и тому же объекту на фото. При калибровке снимков был выполнен пересчёт геодезических координат в прямоугольные в требуемой проекции (в нашем случае UTM 2N). Разреженное облако является набором соответствующих точек (пикселей), которые определяются одновременно на разных снимках и «связываются» в единую трёхмерную модель. В результате обработки снимков БПЛА была получена полная трёхмерная модель поверхности, являющаяся основой для построения ортофотоплана и Цифровой Модели местности (ЦММ) с горизонтальным разрешением 3 см.

Измерение вертикальных движений земной поверхности

Измерения вертикальных движений поверхности почвы в пределах площадки мониторинга «Лаврентия» ($\Delta\eta$) проводились в 2003-2024 гг. в течение летнего сезона с интервалом 2-4 недели (с начала июля по конец сентября) и заключались в определении высоты стальных кольев, установленных в узлах площадки. Измерения проводились рулеткой, прикреплённой к рейке с поперечной планкой внизу, выполняющей роль опоры, с точностью 1 мм. Измерение проводилось для каждого узла точки дважды: с западной стороны кола и с восточной, результат усреднялся. Анализ собранных результатов состоял в последовательном определении величины относительных колебаний поверхности почвы относительно кольев за каждый период наблюдений, выбраковке измерений вытаявших из мерзлоты кольев и измерений кривых кольев. Всего было проанализировано 66 периодов измерений высоты с 15 октября 2003 г. по 25 июля 2024 г.

Геоботанический мониторинг

С 2003 на площадке «Лаврентия» в пик летней вегетации (конец июля – начало августа) проводится определение видового состава растительного покрова и проективное покрытие отдельных видов. Измерения проективного покрытия проводятся визуально при помощи квадратных деревянных рамок 40×40 см в узлах площадок через каждые 10 метров (всего 121 измерение для каждой площадки).

Результаты и обсуждение. Анализ внутрисезонных измерений высоты поверхности показал, что наибольшее опускание дневной поверхности – в среднем до 3 см – отмечается в июле-августе, т.е. в период наиболее высоких летних температур и наибольших скоростей сезонного оттаивания почвы. Измерения в сентябре показывают значительное замедление этого процесса, в некоторых случаях отмечается отсутствие изменений или даже рост отметок поверхности. Например, измерения в конце сентября 2014 года показали, что по сравнению с серединой августа высота поверхности выросла в среднем на 1,2 см. Такое явление, по всей видимости, связано с началом сезонного пучения в результате промерзания пород СТС снизу. Измерения высоты поверхности в начале сезона оттаивания показывают совокупный результат осенне-зимнего пучения и начала осадки в начале тёплого периода. Поэтому значения $\Delta\eta$ в данном случае могут быть как отрицательными (осадка не успела компенсировать пучение), так и положительными. В целом за период наблюдений величина сезонных изменений поверхности (июнь-сентябрь) варьировала в среднем по площадке от -0,5 см до 6,0 см. Величина летнего опускания поверхности почвы в результате осадки значительно превышает осенне-зимнее повышение за счёт морозного пучения: уже к началу июля отметки поверхности в среднем ниже, чем в конце тёплого сезона прошлого года.

Выявление ведущих метеорологических факторов, определяющих сезонные изменения высоты поверхности, является предметом дальнейших исследований.

Межгодовые изменения рельефа площадке были выявлены в результате сопоставления результатов геодезических измерений. Распределение изменений рельефа площадки «Лаврентия» за 2006 и 2023 гг. (Δd) для каждого узла площадки представлено на Рис. 2. Минимальное понижение отметок поверхности за счёт не вытаявших за период наблюдений колеи составило 12 см, максимальное – 69. При сравнении распределения значений Δd с ортофотопланом площадки можно заметить, что наибольшая осадка поверхности наблюдается в ложбине стока, проходящей с юга на восток площадки (см. рис. 2). Таким образом, осадка поверхности в результате постепенного оттаивания высокольдистого переходного слоя происходит неравномерно и определяется, по всей видимости, поверхностными гидрологическими условиями, которые в свою очередь, определены мерзлотно-фациальными условиями верхнего горизонта многолетнемёрзлых пород.

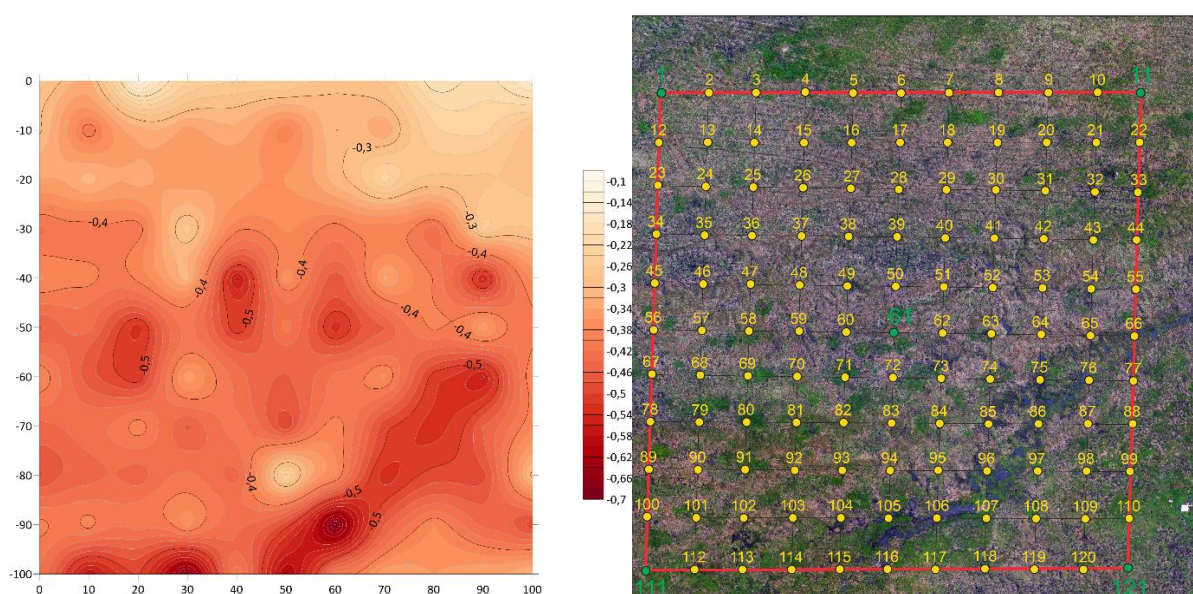


Рис. 2. Площадка САЛМ Лаврентия. Слева – опускание дневной поверхности в результате осадки оттаивающих пород за 2006-2023 гг., м; справа – ортофотоплан.

Наблюдаемые изменения рельефа поверхности являются прямым следствием увеличения теплообеспеченности, т.е. суммы положительных среднесуточных температур воздуха в летний период в Арктике в целом и на Чукотке, в частности. Анализ метеорологической информации показал, что с 1950-х гг. рост среднегодовой температуры воздуха на Чукотском полуострове составлял около $0,7^{\circ}\text{C}$ в десятилетие, ускорившись до $1,1-1,2^{\circ}\text{C}$ с 1990-х гг. [Maslakov et al., 2020]. Таким образом, по сравнению с середины XX века летняя теплообеспеченность выросла на 25-30%.

Необратимая осадка пород вследствие постепенного вытаявания текстурообразующих льдов имеет изотропный характер, поэтому долгое время этот процесс может не проявляться в изменении рельефа дневной поверхности [Shiklomanov et al., 2013]. Определение амплитуды и характера колебаний поверхности полевыми и дистанционными методами затруднено вследствие небольших величин деформации и мощного мохово-растительного покрова тундры, поэтому эффект от осадки оттаивающих пород в Арктике хорошо выражен либо в результате длительных мониторинговых наблюдений [например, O'Neill et al., 2023, либо путём организации специализированных измерений с использованием механических или электрических устройств [Walker et al., 2008].

Изменение рельефа вследствие климатических изменений повлияло и на растительный покров в пределах площадки Лаврентия. Многолетний мониторинг растительности показал, что за 20 лет наблюдений сократилась доля осок и зелёных мхов, выступающих в качестве индикатора избыточного увлажнения территории [Maslakov et al., 2024]. Вместе с тем, доля карликовых ив в растительном покрове также поначалу снижалась в первой половине 2000-х гг., а затем практически не менялась. Примечательно, что начиная с 2010-х гг. зафиксирован рост проективного покрытия сухих осок на площадке. Анализ вегетационного индекса NDVI показал устойчивый рост на протяжении 2000-2023 гг., что говорит в целом о повышении биопродуктивности тундровых сообществ на данной территории [Maslakov et al., 2024]. Таким образом, результаты длительных геоботанических исследований демонстрируют уменьшение роли влаголюбивых видов растительности, что вызвано с одной стороны, ростом летней теплообеспеченности, с другой – иссушением почвы в результате углубления дренажных ложбин и понижением кровли ММП, выполняющей роль водоупора.

Заключение. В работе были представлены результаты длиннопериодных наблюдений за вертикальными движениями дневной поверхности в узлах площадки CALM R-27 Лаврентия. Измерения показали, что осенне-зимнее пучение промерзающих отложений не в состоянии скомпенсировать величину летнего опускания дневной поверхности вследствие осадки пород при оттаивании. Таким образом, за последние 20 лет наблюдалось медленное (первые сантиметры в год), но устойчивое понижение дневной поверхности. При этом ложбины стока углублялись сильнее, чем водораздельные поверхности, что приводило к постепенному иссушению почвенного горизонта и последующей трансформации растительного покрова с одновременным увеличением его биопродуктивности и уменьшением в нём роли влаголюбивых растений. Полученные закономерности в целом соответствуют результатам современных исследований в других районах Арктики [Heijmans et al., 2022; Yang et al., 2024], для которых отмечается рост биопродуктивности сообществ на фоне деградации верхних горизонтов многолетнемёрзлых пород. Проведённые исследования позволяют наметить траектории дальнейшей эволюции рельефа и растительности равнинной криолитозоны Дальневосточного сектора Российской Арктики на фоне продолжения потепления климата и усиления антропогенной нагрузки на экосистемы.

Работа была выполнена в рамках проекта РНФ №23-77-01016 «Трансформация криогенных ландшафтов приморских равнин Чукотки на фоне изменений климата».

ЛИТЕРАТУРА

Анисимов О.А., Жирков А.Ф., Шерстюков А.Б. Современные изменения криосферы и природной среды в Арктике // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. №. 2 (3). С. 24-47.

Гасанов Ш.Ш. Строение и история формирования мёрзлых пород Восточной Чукотки. М.: Наука, 1969. 169 с.

Иванов В.Ф. Четвертичные отложения побережья Восточной Чукотки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1986. 140 с.

Колесников С.Ф., Плахт И.Р. Чукотский район // Региональная криолитология. Под ред. А. И. Попова. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 201-217.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2007. 206 с.

Маслаков А.А., Егоров Е.Г., Зеленский Г.М. Переходный слой многолетнемёрзлых пород приморских равнин Восточной Чукотки // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2020. №. 7. С. 118-123. doi:10.24411/2687-1092-2020-10717

Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. №. 4. С. 18-23.

Тишков А.А., Белоновская Е.А., Кренке А.Н., Тумова С.В., Царевская Н.Г. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем Российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 30-41. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41

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

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. Is. 3. P. 166-258. doi: 10.1080/10889370009377698

Heijmans M.M.P.D., Magnússon R.Í., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J. Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. P. 68–84. doi:10.1038/s43017-021-00233-0

IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

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

Kokelj S.V., Jorgenson M.T. Advances in thermokarst research // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. Vol. 24. Is. 2. P. 108-119. doi: 10.1002/ppp.1779

Liu Z., He D., Shi Q., Cheng X. NDVI time-series data reconstruction for spatial-temporal dynamic monitoring of Arctic vegetation structure // Geo-spatial Information Science. 2024. 1-19. doi:10.1080/10095020.2024.2336602

Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. The Transient Layer of Permafrost of the Eastern Chukotka Coastal Plains, NE Russia. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Moscow, Russia. 2021. <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-049.pdf>

Maslakov A., Grischenko M., Grigoryan A., Zamolodchikov D. Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi Peninsula (Russian Northeast) // J. Geogr. Inst. Cvijic, 2024. 3 (74), in press.

Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N., Yurov F.D., Yoshikawa K., Kraev G.N. Community Ice Cellars In Eastern Chukotka: Climatic And Anthropogenic Influences On Structural Stability // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13. Is. 3. P. 49–56. doi:10.24057/2071-9388-2020-71

Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Volobuev V., Kraev G. Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models // Geosciences. 2019. Vol. 9. Is. 5, 232. doi:10.3390/geosciences9050232

Maslakov A., Zotova L., Komova N., Grishchenko M., Zamolodchikov D., Zelensky G. Vulnerability of the Permafrost Landscapes in the Eastern Chukotka Coastal Plains to Human Impact and Climate Change // Land. 2021. Vol. 10. Is. 5, 445. doi:10.3390/land10050445

Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Romanovsky V.E., Boike J. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic // Nature communications. 2018. Vol. 9. Is. 1, 5423. doi: 10.1038/s41467-018-07663-3

Nyland K.E. et al. Long-term Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra // Polar Geography. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 167-185. doi: 10.1080/1088937X.2021.1988000

O'Neill H., Smith S., Burn C., Duchesne C., Zhang Y. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in northwest Canada // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2023. Vol. 128. Is. 8, e2023JF007262 doi:10.1029/2023JF007262

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nyland K.E. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. Is. 5, 129. doi: 10.3390/geosciences13050129

Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3, 168. doi:10.1038/s43247-022-00498-3

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. Is. 24. P. 6356-6361. doi: 10.1002/2013GL058295

Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15. Is. 4, 045001 doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12

Vasil'chuk Y.K., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Komova N.N. Isotope signature of the massive ice bodies on the northeast coast of Chukotka Peninsula // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. Vol. 14. Is. 4. P. 9-19. doi: 10.24057/2071-9388-2021-020

Walker D.A., Epstein H.E., Romanovsky V.E., Ping C.L., Michaelson G.J., Daanen R.P., Daniëls F.J.A. Arctic patterned-ground ecosystems: A synthesis of field studies and models along a North American Arctic Transect // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. Is. G3. doi: 10.1029/2007JG000504

Yang Y., Wang X., Wang T. Permafrost Degradation Induces the Abrupt Changes of Vegetation NDVI in the Northern Hemisphere // *Earth's Future*. 2024. Vol. 12. Is. 10, e2023EF004309. doi:10.1029/2023EF004309

EVOLUTION OF MICRORELIEF AT THE CALM R-27 LAVRENTIYA SITE (EASTERN CHUKOTKA) DUE TO CURRENT CLIMATE CHANGE

Maslakov A.A.¹, Zamolodchikov D.G.², Zelensky G.M.³

¹ Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² HSE University, Faculty of Geography and Geoinformatics, Moscow, Russia

³ Non-commercial partnership "Chukotka Science Support Group", Lavrentiya, Chukotka Autonomous District, Russia

Monitoring studies of the parameters of the active layer of permafrost have been conducted in the territory of Eastern Chukotka within the framework of the CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) program since 2000. In addition to measuring the thickness of the seasonally thawed soil layer within two CALM sites, the value of seasonal soil subsidence during thawing, the moisture content of the near-surface soil layer, and the projective cover of the vegetation cover are also determined annually in CALM R-27 Lavrentiya. Surface subsidence is determined by measuring the relative height of stakes frozen into permafrost located at the site nodes during the summer season. The projective cover of vegetation is determined using measuring frames once a year, at the peak of the vegetation period. Studies have revealed that over 20 years, due to thawing of the ice-rich transient layer, the surface of the site has dropped by several decimeters. During this time, the drainage troughs have deepened. The change in relief entailed a change in moisture conditions and, consequently, in the species content of vegetation. The conducted studies allow us to outline the trajectories of further evolution of the relief and vegetation of the permafrost plains due to continued climate warming in the Arctic and increased anthropogenic pressure on ecosystems.

Keywords: *Chukotka, permafrost, active layer, transient layer, monitoring*

REFERENCES:

Anisimov O.A., Zhirkov A.F., Sherstyukov A.B. (2015). Modern changes in cryosphere and environment in the Arctic // *Arctic XXI century*. 2015. Vol. 2. Is. 3. P. 24–47. (in Russian).

- Gasanov Sh.Sh.* Structure and history of formation of frozen rocks of Eastern Chukotka, Nauka, Moscow 1969. 169 p (in Russian).
- Ivanov V.F.* Quaternary deposits of the coast of Eastern Chukotka. Far Eastern Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, Vladivostok, 1986. 140 p (in Russian).
- Kolesnikov S.F., Plakht I.R.* Chukotskiy rajon [Chukchi region]. In A.I. Popov (Ed.), Regional Cryolithology. MGU. 1989. P. 201–217. (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I.* Cryogenic landslides of Yamal and the Yugorsk Peninsula. Institute of Cryosphere of the Earth SB RAS, Tyumen, 2007 (in Russian).
- Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M.* Permafrost transient layer of Eastern Chukotka coastal plains // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2020. Issue 7. P. 118-123. doi:10.24411/2687-1092-2020-10717.
- Moskalenko N.G.* Change in the temperature of rocks and vegetation under the influence of changing climate and technogenesis in the Nadym region of Western Siberia // Earth's Cryosphere. 2009. Vol. 4. Is. 13. P. 18-23 (in Russian).
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Krenke A.N., Titova S.V., Tsarevskaya N.G.* Changes in the biological productivity of terrestrial ecosystems of the Russian Arctic in the 21st century // Arctic: Ecology and Economics. 2021. Vol. 11. Is. 1. P. 30-41. doi:10.25283/2223-4594-2021-1-30-41
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Lantuit H.* Permafrost is warming at a global scale // Nature communications. 2019. Vol. 10. doi:10.1038/s41467-018-08240-4
- 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. Is. 3. P. 166-258. doi:10.1080/10889370009377698
- Heijmans M.M.P.D., Magnússon R.Í., Lara M.J., Frost G.V., Myers-Smith I.H., van Huissteden J., Jorgenson M.T., Fedorov A.N., Epstein H.E., Lawrence D.M., Limpens J.* Tundra vegetation change and impacts on permafrost // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. P. 68–84. doi:10.1038/s43017-021-00233-0
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- 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
- Kokelj S.V., Jorgenson M.T.* Advances in thermokarst research // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. Vol. 24. Is. 2. P. 108-119. doi: 10.1002/ppp.1779
- Liu Z., He D., Shi Q., Cheng X.* NDVI time-series data reconstruction for spatial-temporal dynamic monitoring of Arctic vegetation structure // Geo-spatial Information Science. 2024. 1-19. doi:10.1080/10095020.2024.2336602
- Maslakov A.A., Egorov E.G., Zelensky G.M., Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A.* The Transient Layer of Permafrost of the Eastern Chukotka Coastal Plains, NE Russia. Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Moscow, Russia. 2021. <https://www.poac.com/Proceedings/2021/POAC21-049.pdf>
- Maslakov A., Grischenko M., Grigoryan A., Zamolodchikov D.* Long-term effect of warming-induced permafrost thawing on tundra vegetation – the evidence from the Chukchi Peninsula (Russian Northeast) // J. Geogr. Inst. Cvijic, 2024. 3 (74), in press.
- Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N., Yurov F.D., Yoshikawa K., Kraev G.N.* Community Ice Cellars In Eastern Chukotka: Climatic And Anthropogenic Influences On Structural Stability // Geography, Environment, Sustainability. 2020. Vol. 13. Is. 3. P. 49–56. doi:10.24057/2071-9388-2020-71
- Maslakov A., Shabanova N., Zamolodchikov D., Volobuev V., Kraev G.* Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models // Geosciences. 2019. Vol. 9. Is. 5, 232. doi:10.3390/geosciences9050232
- Maslakov A., Zotova L., Komova N., Grishchenko M., Zamolodchikov D., Zelensky G.* Vulnerability of the Permafrost Landscapes in the Eastern Chukotka Coastal Plains to Human Impact and Climate Change // Land. 2021. Vol. 10. Is. 5, 445. doi:10.3390/land10050445

Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Romanovsky V.E., Boike J. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic // *Nature communications*. 2018. Vol. 9. Is. 1, 5423. doi: 10.1038/s41467-018-07663-3

Nyland K.E. et al. Long-term Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program observations in Northern Alaskan tundra // *Polar Geography*. 2021. Vol. 44. Is. 3. P. 167-185. doi: 10.1080/1088937X.2021.1988000

O'Neill H., Smith S., Burn C., Duchesne C., Zhang Y. Widespread permafrost degradation and thaw subsidence in northwest Canada // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2023. Vol. 128. Is. 8, e2023JF007262 doi:10.1029/2023JF007262

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nyland K.E. Localized vegetation, soil moisture, and ice content offset permafrost degradation under climate warming // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. Is. 5, 129. doi: 10.3390/geosciences13050129

Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // *Communications Earth & Environment*, 2022. 3, 168. doi:10.1038/s43247-022-00498-3

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. Is. 24. P. 6356-6361. doi: 10.1002/2013GL058295

Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., Malkova G.V., Nyland K.E., Streletskiy D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15. Is. 4, 045001 doi: 10.1088/1748-9326/ab6f12

Vasil'chuk Y.K., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Komova N.N. Isotope signature of the massive ice bodies on the northeast coast of Chukotka Peninsula // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. Vol. 14. Is. 4. P. 9-19. doi: 10.24057/2071-9388-2021-020

Walker D.A., Epstein H.E., Romanovsky V.E., Ping C.L., Michaelson G.J., Daanen R.P., Daniëls F.J.A. Arctic patterned-ground ecosystems: A synthesis of field studies and models along a North American Arctic Transect // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2008. Vol. 113. Is. G3. doi: 10.1029/2007JG000504

Yang Y., Wang X., Wang T. Permafrost Degradation Induces the Abrupt Changes of Vegetation NDVI in the Northern Hemisphere // *Earth's Future*. 2024. Vol. 12. Is. 10, e2023EF004309. doi:10.1029/2023EF004309