

ПЕРЕХОДНЫЙ СЛОЙ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОД ПРИМОРСКИХ РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ

¹Маслаков А.А., ¹Егоров Е.Г., ²Зеленский Г.М.

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

² Некоммерческое партнёрство «Чукотская группа поддержки научных исследований», с. Лаврентия, Чукотский АО, Россия

В работе представлены результаты полевых и лабораторных исследований параметров переходного слоя многолетнемёрзлых пород приморских равнин Восточной Чукотки. Переходный слой подстилает сезонно-талый слой и характеризуется повышенным содержанием льда, что определяет его протекторные характеристики в условиях короткопериодных колебаний температуры воздуха. В пределах ключевого полигона было выполнено изучение рельефа и четвертичных отложений, выполнены буровые работы, а также проведён анализ изотопного состава льдов, вскрытых в скважинах. В результате исследований были определены вариации мощности переходного слоя, его криолитологическое строение, а также состав стабильных изотопов кислорода.

Ключевые слова: *Чукотка, многолетнемёрзлые породы, сезонноталый слой, переходный слой, климатические изменения*

Введение. Современные климатические изменения неизбежно отражаются на состоянии многолетнемёрзлых пород (ММП). В первую очередь, это касается роста температуры пород и мощности сезонно-талого слоя (СТС) [Romanovskiy et al., 2017; Biskaborn et al., 2019] в различных регионах криолитозоны, включая Северо-восток России [Abramov et al., 2019]. Важную роль в теплообмене ММП и атмосферы играет т.н. переходный слой (ПС) – горизонт в пределах самой верхней части кровли мерзлоты, способный переходить в талое состояние в условиях, максимально благоприятных для оттаивания (Шур, 1988). Переходный слой многолетнемёрзлых пород (ММП) является одной из наиболее сложноорганизованных по составу и криогенному строению частью грунтовой толщи как в вертикальном разрезе, так и в горизонтальном простираии. Он имеет исключительное значение для ряда процессов, происходящих в верхних слоях мёрзлой толщи [Романовский, 1993; Shur et al., 2005; Луначёв, Губин, 2008]. Вместе с сезонно-талым слоем он образует некоторую буферную систему, определяющую достаточно широкие условия существования мёрзлых пород, из-за этого некоторые исследователи [Конищев, 2009] называют его защитным слоем. Многочисленные исследования показали, что ПС имеет высокое содержание льда, в результате чего он препятствует излишнему протаиванию верхней части ММП и способствует сохранению её теплоустойчивости [Shur et al., 2005]. Климатические тренды последних десятилетий привели к частичной или полной деградациии переходного слоя, что отражается на активизации экзогенных процессов: термокарста, термоэрозии и криогенных оползней, в большом количестве зафиксированных в разных регионах криолитозоны [Nitze et al., 2019], включая области низкотемпературной мерзлоты [Farquharson et al., 2019]. Для территории Восточной Чукотки прогнозные темпы деградациии ММП в XXI веке приведут к значительному понижению дневной поверхности и активизации экзогенных процессов [Maslakov et al., 2019]

Цель данной работы – определить текущие параметры (мощность, льдистость, криотекстура, изотопный состав и распространение) переходного слоя на ключевом полигоне исследований Восточной Чукотки. Основой исследований являются многолетние мониторинговые наблюдения за глубиной сезонного оттаивания и осадки поверхности почвы, данные бурения неглубоких скважин 2019-2020 гг., а также результаты полевых ландшафтных описаний.

Район исследований. Ключевой полигон исследований (Рис. 1, жёлтый контур) имеет площадь 440 км². Он расположен в пределах приморских равнин восточной части Чукотского полуострова и примыкающих к ним предгорий и склонов хребта Гэнканый (Тенианый), сложенных докембрийскими породами и нижнедевонскими сланцами, прорванными раннемеловыми гранитными интрузиями.

Равнина представляет собой пологонаклонные поверхности, составляющие систему террас различного возраста и генезиса. В восточной части полигона, на южном берегу залива Лаврентия располагается V (IV?) озёрно-ледниковая терраса, сложенная моренными отложениями нижнего Плейстоцена (Q_I²) (Оляйонская свита) и достигающая высоты 60-80 м н.у.м. Поверхность террасы увалистая, слабонаклонная. На побережье залива Лаврентия выходит в виде многочисленных термоцирков и морских абразионных уступов высотой до 20 м. Отложения представлены суглинком серого и сизого цвета, с включением несортированных слабоокатанных обломков диаметром до 2 метров, в морских обнажениях встречаются вкладыши из песка среднезернистого с включением гальки. Моренные отложения фрагментарно перекрыты голоценовыми торфяниками, вмещающими повторно-жильные льды [Vasil'chuk et al., 2018].

Центральная и западная части полигона представлены IV морской и ледниково-морской террасой (Q_{II}²⁻⁴) высотой 40-80 м н.у.м., сложенной Оляйонскими суглинками серыми с включением валунов и разнозернистыми песками серыми, жёлтыми и палевыми с включением гальки (вероятно, Мечигменской свиты). Поверхность террасы ровная, имеет слабый уклон в сторону моря, на побережье осложнена оврагами и балками.

III морская терраса (Q_{III}¹) имеет абсолютные высоты 15-30 м, сложена песками с включением гальки Мечигменской и Крестовской свит. В пределах полигона терраса встречается в восточной части, она также формирует эрозионные останцы в долине р. Лоринки.

В восточной части полигон представлен долинным комплексом р. Лоринки (см. Рис. 1). Надпойменная терраса р. Лоринки имеет высоту 10-15 м и сложена песками, супесями и суглинками голоценового возраста. Пойма реки, как и других рек в пределах полигона узкая, сложена суглинками и супесями, русла выстланы аллювием из гальки и окатанных валунов.

Для территории Восточной Чукотки характерно сочетание арктического и субарктического климата, что вызвано значительным влиянием морских воздушных масс. Лето пасмурное и прохладное, зима длительная, с частыми и затяжными метелями. Среднегодовое количество осадков на востоке Чукотки растёт с севера на юг от 230 (Уэлен) до 690 мм (Провидения) [Кобышева, 2001].

Многолетнемёрзлые породы распространены здесь повсеместно. Талики присутствуют лишь под крупными реками и озёрами. В низменных прибрежных районах мощность мерзлоты составляет 100-200 м, температура -4..-6°C [Гасанов, 1969], однако термических наблюдений в слое годовых колебаний температуры не производится. Широко распространены термокарстовые и термоэрозионные формы рельефа, пластовые и повторно-жильные льды [Гасанов, 1969; Маслаков и др., 2018; Vasil'chuk et al., 2018].

На вершинах и склонах сопок выше 100 м н.у.м. распространены гольцы и каменисто-лишайниковые тундры с небольшими пятнами альпийских луговин. На пологих склонах и низких междуречьях широко распространены мелкопочварные и кустарничково-травяные тундры. Понижения между бугорками, которые образуют группы кочек, заняты сфагновыми мочажинами. В долинах рек, на морских террасах, в глубоких ложбинах в нижней части склонов гор развиты тундры с участием стелющихся кустарников, а также осоковые луговины.

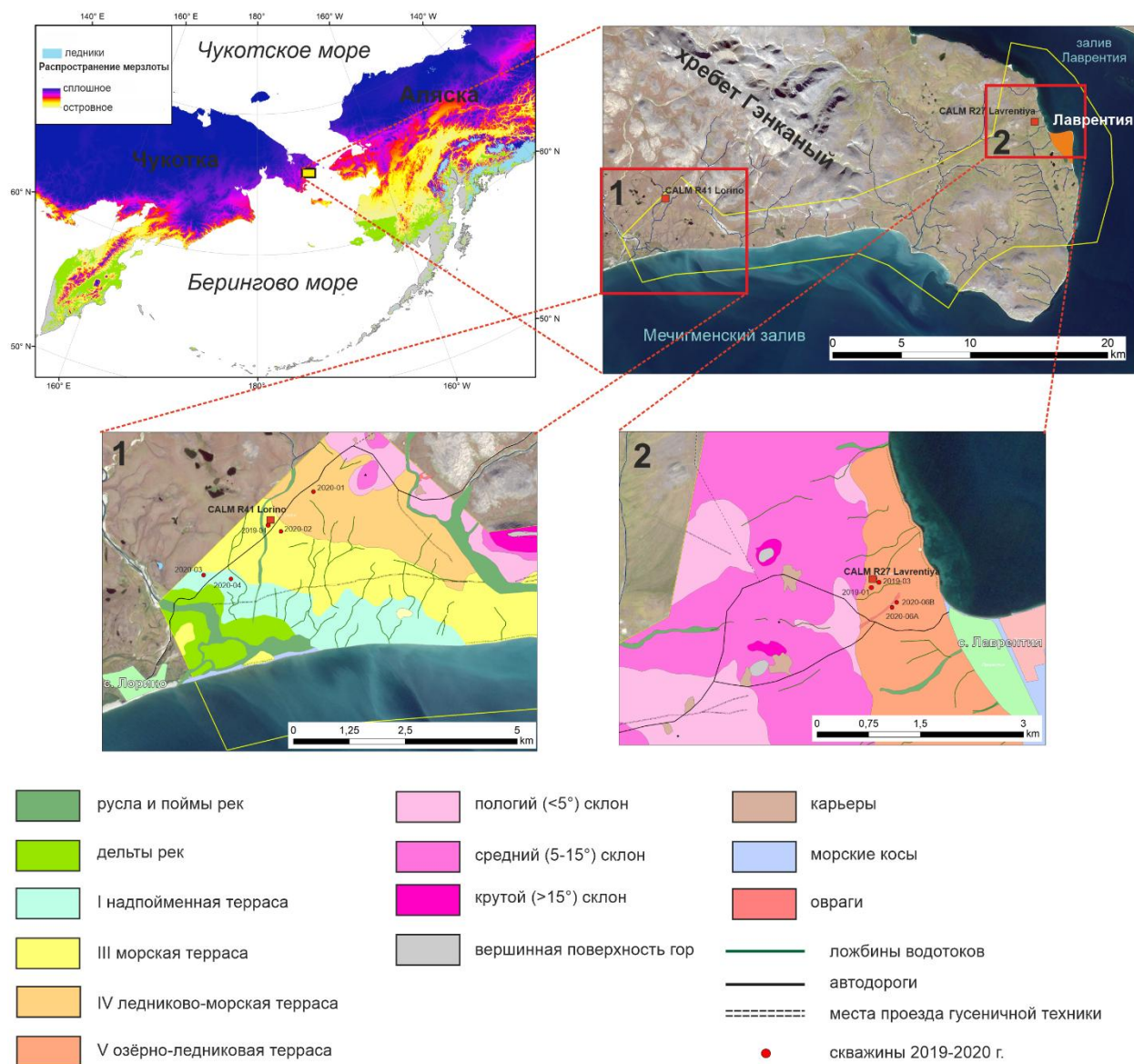


Рис. 1. Слева сверху – положение района исследований на карте распространения ММП (Gruber, 2012); справа сверху – полигон исследований; снизу – участки мониторинга СТС и проведения буровых работ.

Материалы и методы. Исследование четвертичных отложений в пределах полигона производилось путём анализа литературных источников [Гасанов, 1969; Иванов, 1986], а также с использованием Государственной геологической карты масштаба 1:200 000 (лист Q-2-XXI, XXII, XXIII). Изученные материалы сопоставлялись с результатами маршрутных наблюдений и бурения неглубоких скважин.

Бурение СТС и верхних горизонтов ММП (до 2 м) проводилось вблизи мониторинговых площадок CALM при помощи мотобура ADA GroundDrill 15, с использованием буровых ложек и колонковых труб. Извлечённый керн описывался, проводилась визуальная оценка льдистости и отбор проб воды изо льда на геохимический и состав стабильных изотопов кислорода. Пробуренные скважины представлены на Рис. 1. Влажность отложений определялась весовым методом.

Результаты. Анализ рельефа, растительности и четвертичных отложений полигона показал пёстрое сочетание ландшафтно-литологических условий. Мёрзлые породы, вскрытые в скважинах, позволяют оценить состояние переходного горизонта и его характеристики. Было установлено, что отложения озёрно-ледниковой террасы на востоке полигона слагаются с поверхности суглинками с включением обломков различного размера, при верхней слой ММП имеет слоистую криотекстуру, его влажность (W_{tot})

варьируется в пределах 70-110% в суглинках и 200-600% в линзах торфа. Мощность переходного слоя, определяемая по более высокой влажности пород, по данным 5 скважин, составляет 50-70 см. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$) льда в слое варьирует в пределах -11,5...-13,5‰.

Отложения IV морской и ледниково-морской террасы были вскрыты 2 скважинами в центральной и западной частях полигона. В скважине 2020-01, пробуренной ближе к тыловой части террасы (см. Рис. 1), обнаружены суглинки, супеси и прослой торфа с включением щебня и дресвы. Криотекстура суглинисто-супесчаных отложений массивная ($W_{\text{tot}} = 25-120\%$), торфа – линзовидная ($W_{\text{tot}} = 150-200\%$). По всей видимости, ПС здесь сильно редуцирован, либо отсутствует вовсе. Скважина 2020-05, вскрывающая отложения террасы в центре полигона (Рис. 2), имеет чётко выраженный переходный слой мощностью 1 м с решётчатой криогенной текстурой. Изотопный состав льда по мере роста глубины понижается с -12,5‰ до -18‰, захватывая отложения собственно ММП, подстилающих ПС.

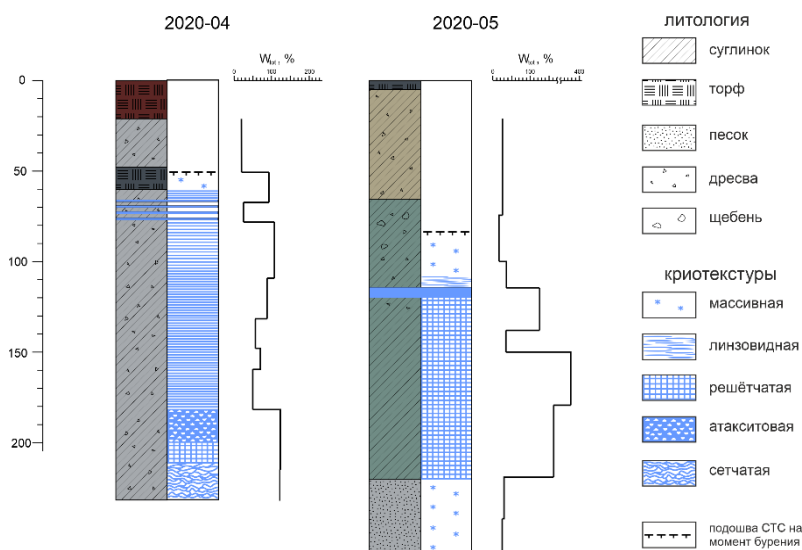


Рис. 2. Криолитологические колонки и вариации влажности скважин, вскрывающих I речную террасу (слева) и IV ледниково-морскую террасу (справа).

Отложения III морской террасы с поверхности представляют собой суглинистые отложения без включений, переслаиваемые линзами торфа, либо торфяниками. Вскрытая мощность ПС составляет 50 см, подошва не обнаружена. Влажность отложений ПС здесь составляет около 100%, криотекстуры слоистые, линзовидные, часто встречаются прослой чистого льда мощностью 3-8 см. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ во льду составляют -11,4 до -13,4 ‰ без отчётливого тренда по глубине.

Скважины, пробуренные на I террасе р. Лоринки, вскрывают торфяник (скв. 2020-03) и пачку суглинков с включением дресвы (скв. 2020-04, Рис. 2). Влажность торфа в торфянике превышает 1000% вблизи кровли ПС (70 см) и снижается с глубиной до 400% (160 см). Криотекстура решётчатая, атакситовая, изотопный состав льда варьирует от -12,4 до -16,8‰. Суглинистые отложения имеют слоистую, реже сетчатую, атакситовую и решётчатую криотекстуры, влажность отложений ПС составляет 120-150%, без градиента по глубине (см. Рис. 2). По всей видимости, ПС начинается с глубины 70 см и плавно переходит в ММП, с небольшим скачком влажности и сменой криотекстуры на глубине 185 см.

Пойменные отложения, а также рыхлый чехол склонов хребта Тенианый бурением не вскрывались.

Заключение. Проведённые исследования выявили значительные вариации параметров переходного слоя в пределах ключевого полигона исследований на Восточной Чукотке. В зависимости от геоморфологического уровня и состава отложений, мощность переходного слоя может составлять от 0,1 до 1,0 метра, его весовая влажность варьируется в широких пределах: от 70-150% в суглинках до 1000% в торфах, при этом отмечается понижение влажности отложений с ростом глубины. Примечательно, что состав стабильных изотопов воды в ПС по всех скважинах идентичный и варьирует от -11,4 до -14,0‰. По мнению авторского коллектива, более лёгкие значения изотопного

состава могут свидетельствовать о переходе ПС в ММП и маркировать собой его подошву.

Работа была выполнена в рамках проекта РНФ №19-77-00045 «Восприимчивость многолетнемерзлых пород приморских равнин Восточной Чукотки к современным климатическим изменениям», изотопные исследования были выполнены при поддержке гранта РФФИ №20-05-00782.

ЛИТЕРАТУРА

Гасанов Ш.Ш. Строение и история формирования мерзлых пород восточной Чукотки. М.: Наука, 1969. 167 с.

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

Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. №. 4.

Луначев А.В., Губин С.В. Участие почвообразования в формировании и организации переходного слоя многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. №. 2. С. 75-83.

Маслаков А.А., Белова Н.Г., Баранская А.В., Романенко Ф.А. Пластовые льды на восточном побережье Чукотского полуострова при потеплении климата: некоторые итоги экспедиций 2014-2018 гг. // Арктика и Антарктика. 2018. №4. С. 30-43. doi: 10.7256/2453-8922.2018.4.28528

Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы // М.: изд-во МГУ. – 1993.

Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск. – 1988.

Abramov A., Davydov S., Ivashchenko A., Karelin D., Kholodov A., Kraev G., Shmelev D. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia // Polar Geography. 2019. P 1-17. <https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1648581>

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Allard M. Permafrost is warming at a global scale // Nature communications. 2019. 10(1). P. 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>

Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S., Nicolsky D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. P. 6681-6689. <https://doi.org/10.1029/2019GL082187>

Gruber S. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation // The Cryosphere. 2012. Vol. 6. Is. 1. P. 221–233. <https://doi.org/10.5194/tc-6-221-2012>

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. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050232>

Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Romanovsky V.E., Boike J. Author Correction: Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic // Nature communications, 2019. Vol. 10(1), 472. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3>

Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D. Changing permafrost and its impacts / Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), AMAP, Oslo, Norway, 2017, pp. 65-102.

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

Vasil'chuk Y.K., Budantseva N.A., Farquharson L.M., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Chizhova J.N. Isotopic evidence for Holocene January air temperature variability on the East

Chukotka Peninsula // Permafrost and Periglacial Processes. 2018. Vol. 29. Is. 4. P. 283-297.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1991>

PERMAFROST TRANSIENT LAYER OF EASTERN CHUKOTKA COASTAL PLAINS

¹*Maslakov A.A.,* ¹*Egorov E.G.,* ²*Zelensky G.M.*

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Non-commercial partnership "Chukotka Science Support Group", Lavrentiya, Chukotka Autonomous District, Russia

The paper presents the results of field and laboratory studies of the parameters of permafrost transient layer of Eastern Chukotka coastal plains. The transient layer underlies the active layer and is characterized by an increased ice content, which determines its protective characteristics under conditions of short-period fluctuations in air temperature. Within the key area, the relief and Quaternary sediments were studied, surficial drilling was conducted, and the isotopic composition of the ice exposed in the boreholes was analyzed. As a result, variations in the transient layer thickness, its cryolithological structure, and the composition of stable oxygen isotopes were determined.

Keywords: *Chukotka, permafrost, active layer, transient layer, climate change*