

ДЕГРАДАЦИЯ ЛЬДИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИМОРСКИХ РАВНИН ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ ПРИ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Маслаков А.А., Комова Н.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Исследование посвящено оценке текущих и прогнозных темпов деградации льдистых мёрзлых отложений и залежеобразующих льдов приморских равнин Восточной Чукотки, подстилающих сезонноталый слой (СТС). На площадках мониторинга глубины сезонного протаивания пород CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) были проанализированы динамика СТС и темпы осадки поверхности почвы. Выявлен необратимый процесс понижения дневной поверхности, сопровождаемый ростом расчленённости рельефа и образованием криогенных оползней. Полученные летом 2019 года результаты неглубокого kernового бурения позволили оценить льдистость приповерхностных многолетнемёрзлых отложений и скорректировать существующие прогнозы динамики СТС в соответствии с общепринятыми сценариями изменения климата.

Ключевые слова: Чукотка, многолетнемёрзлые породы, сезонноталый слой, переходный горизонт, пластовый лёд, климатические изменения

Введение. Деградация многолетнемёрзлых пород (ММП), вызванная современными климатическими изменениями, отмечается во многих регионах криолитозоны мира (например, [Romanovskiy et al., 2017]). Ранее считалось [Romanovskiy et al., 2010] что оттаивание пород происходит преимущественно в южной криолитозоне, в то время как в высоких широтах наблюдался рост отрицательных температур без фазовых переходов. Однако в последнее время деградация мёрзлых пород отмечается в районах с низкотемпературными грунтами [Farquharson et al., 2019], что сопровождается интенсивным развитием термокарстовых процессов [Nitze et al., 2019]. Оттаивание многолетней мерзлоты имеет комплексные последствия. Термокарст, термоэрозия и образование криогенных оползней на территориях освоения ведут к разрушению инженерных сооружений, повышают геологические риски на застроенных участках и увеличивают текущий и прогнозный экономический ущерб [Бадина, 2017; Hjort et al., 2018; Shiklomanov et al., 2017]. Высвободившее в результате таяния органическое вещество усиливает парниковый эффект, вызывая эффект положительной обратной связи [Schuur et al., 2015]. Изменение мерзлотных условий в результате потепления в Арктике ведёт также к сложной и неоднозначной перестройке гидрологических систем [Liljedahl et al., 2016; Walvoord, Kurylyk, 2016].

Цель данной работы – оценить текущие и прогнозные темпы оттаивания многолетнемёрзлых пород в отдалённом районе Российской Арктике – Восточной Чукотке. В основу исследований легли многолетние мониторинговые наблюдения за глубиной сезонного оттаивания и осадки поверхности почвы, результаты метеорологического реанализа, данные поверхностного бурения, а также материалы полевых исследований криогенных прибрежных оползней, образовавшихся в 2015-2019 гг.

Район исследований. Приморские равнины восточной части Чукотского полуострова представляют собой пологонаклонные предгорья хребта Гэнканый (Тенианый) мезозойской складчатости. Это плейстоценовые морские, флювиогляциальные и моренные равнины, испещренные болотами и термокарстовыми озерами, голоценовые морские косы, долины рек [Маслаков и др., 2018].

Восточная Чукотка располагается в зоне арктического и субарктического климата и испытывает значительное влияние 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].

Многолетнемерзлые породы распространены здесь повсеместно. Талики присутствуют лишь под крупными реками и озёрами. В низменных прибрежных районах мощность мерзлоты составляет 100-200 м, температура $-4..-6^{\circ}\text{C}$ [Гасанов, 1969]. Но термических наблюдений 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 сопков выше 50 м н.у.м. распространены гольцы и гольцовые тундры. На пологих склонах и низких междуречьях широко распространены мелкопочварные 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 кустарничково-травянистые тундры.

Материалы и методы.

Исследования параметров сезонноталого слоя (температурный и влажностной режим, мощность, осадка поверхности почвы при оттаивании) проводились на 2 площадках CALM (см. Рис. 1) «Лорино» и «Лаврентия», являющихся

репрезентативными для приморских равнин Восточной Чукотки [Maslakov et al., 2019]. Площадка Лорино представляет собой участок плоского заболоченного торфяника, покрытого разнотравной кочкарниковой тундрой; площадка Лаврентия расположена на склоне залива Лаврентия и занята осоковой тундрой на суглинистом субстрате. Для Лорино период наблюдений охватывает 2010-2019 гг., для Лаврентия – 2000-2019 гг. Измерения температуры и влажности проводились в автоматическом режиме при помощи логгеров-самописцев. Изменения

мощности СТС (см) и осадки поверхности почвы (мм) проводились несколько раз за тёплый сезон, включая период максимального оттаивания пород (конец сентября).

Бурение СТС и верхних горизонтов ММП (до 2 м) проводилось вблизи указанных площадок при помощи мотобура ADA GroundDrill 15 при помощи буровых ложек. Извлечённый керн описывался, проводилась визуальная оценка льдистости и отбор проб воды из льда на геохимический и изотопный состав. Всего было пробурено 3 скважины около CALM Лаврентия и 1 скважина около площадки Лорино.

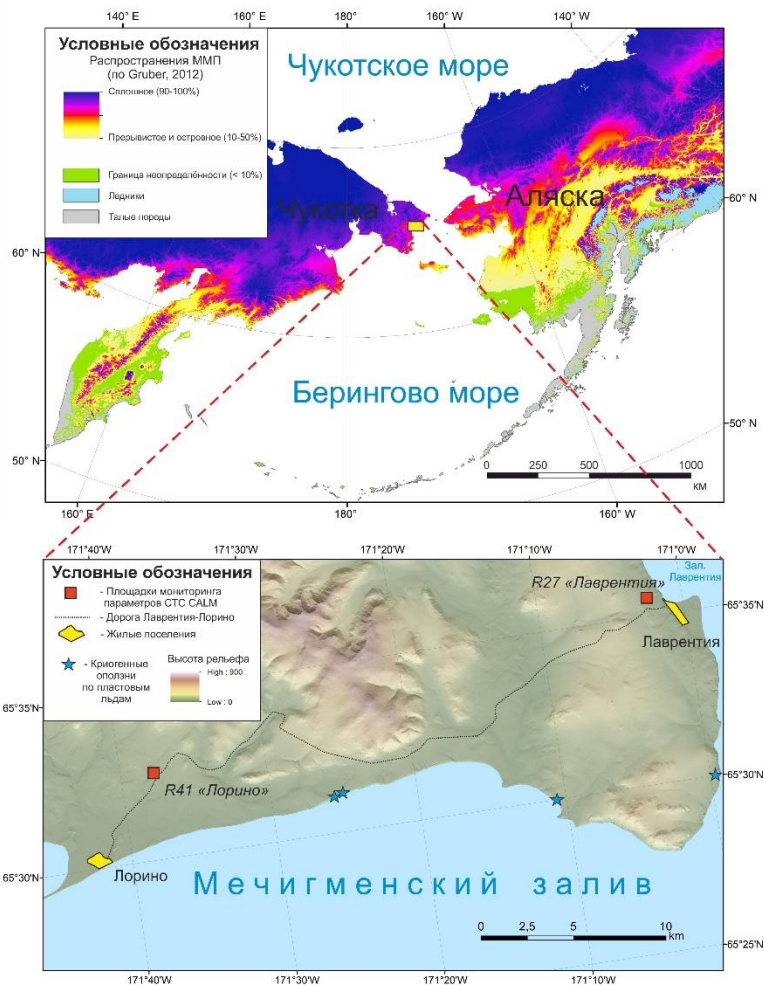


Рис.1. Расположение площадок мониторинга параметров сезонноталого слоя.

Для анализа климатических изменений в регионе был использован реанализ NCEP/NCAR [Kalnay, 1996] по ближайшему к площадкам CALM узлу сетки. В качестве прогнозных данных по динамике климатических параметров были использованы данные расчётов климатических моделей, выполненных в рамках 5-й фазы Проекта сравнения совместных моделей (CMIP5). Были рассмотрены два климатических сценария: «жесткий» RCP8.5, предполагающего наибольшие выбросы парниковых газов в атмосферу и наибольшую интенсивность потепления, и «мягкого» RCP2.6, предполагающего сохранение концентраций на уровне 2020-2030 гг.

Результаты и обсуждение. Результаты измерений мощности СТС на обеих площадках CALM демонстрируют рост мощности СТС со скоростью 0,7-1,8 см/год. В то же время измерения

осадки почвы при оттаивании по замороженным кольям на площадках показывают, что величина опускания поверхности за летний период не компенсируется за счёт зимнего пучения грунтов полностью. Таким образом среднегодовое значение опускания

уровня поверхности за 2012-2019 гг. составило в среднем 2,2 см. Чтобы оценить среднегодовую скорость опускания кровли ММП, нужно указанное значение добавить к

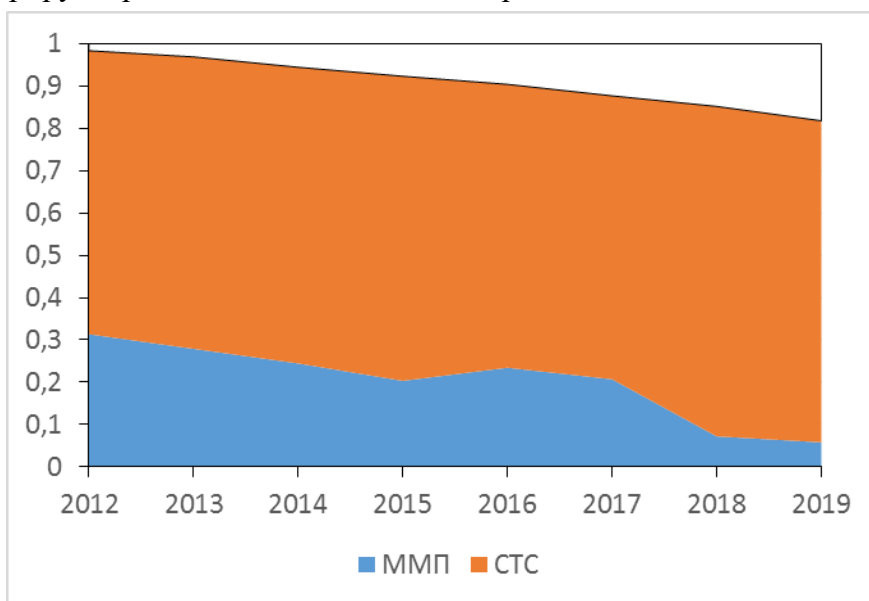


Рис. 2. Динамика опускания кровли ММП (м) за счёт роста глубин оттаивания и необратимой осадки поверхности почвы при оттаивании за 2012-2019 гг. для площадки CALM Лаврентия

существующему тренду роста СТС (Рис. 2). Для площадки Лаврентия, имеющей наиболее полный массив измерений осадки и СТС, это значение составляет 2,9 см/год; всего же опускание кровли ММП за 2012-2019 здесь составило около 27 см. Результаты бурения вблизи площадок CALM показаны на Рис. 3. Скважины 2019-01..2019-03 пробурены вблизи площадки CALM Лаврентия, а 2019-04 – в 30 м к югу от площадки Лорино. Из рисунка видно, что кровля высокольдистых отложений и льда расположены на различных отметках по отношению к подошве СТС на момент бурения (конец августа). Учитывая, что максимальной глубины сезонное протаивание здесь достигло в конце сентября, подошва СТС к этому времени опустилась на 16 см для Лаврентия и 13 см для Лорино. Таким образом, принимая грунтовые условия в точках бурения и на площадках CALM одинаковыми, в 2019 году только в скважине 2019-01 СТС не достигло высокольдистых отложений или льда (расстояние 54 см). В то же время в скважине 2019-02 подошва СТС приблизилась вплотную к кровле льда, а в 2019-03 уже затронула таянием льдистый торфяной горизонт. Для единственной скважины вблизи площадки CALM Лаврентия ситуация выглядит более стабильной: кровля прослой чистого льда расположена на 60 см, в то время как глубина максимального развития СТС расположена примерно на глубине 38 см.

Согласно результатам прогнозирования климатических параметров и моделирования состояния слоя сезонного оттаивания [Maslakov et al., 2019], к концу XXI столетия мощность СТС для данного региона вырастет на 6-13% при сценарии RCP 2.6 (позитивный) и на 43-87% при RCP 8.5 (негативный), при этом скорость понижения

поверхности почвы за счёт осадки грунтов при оттаивании будет варьировать от 0,4-1,5 до 1,6-3,7 см/год в зависимости от климатического сценария. Такой прогноз вкупе с результатами бурения позволяет предположить, что при продолжающемся потеплении температуры воздуха в высоких широтах фронт оттаивания заденет льдистые отложения или кровлю пластовых льдов

(см. Рис. 1), отчего следует ожидать роста расчленённости рельефа территории приморских равнин Чукотки, образования эрозионных форм, таких как оползни, овраги, термокарстовые просадки. Количество точек бурения может выглядеть нерепрезентативным на данный момент, однако буровые работы 2020 года предполагают покрытие более обширных участков вблизи площадок CALM с ландшафтной и геоморфологической привязкой. Это позволит дать более точные прогнозы развития деструктивных экзогенных процессов в зависимости.

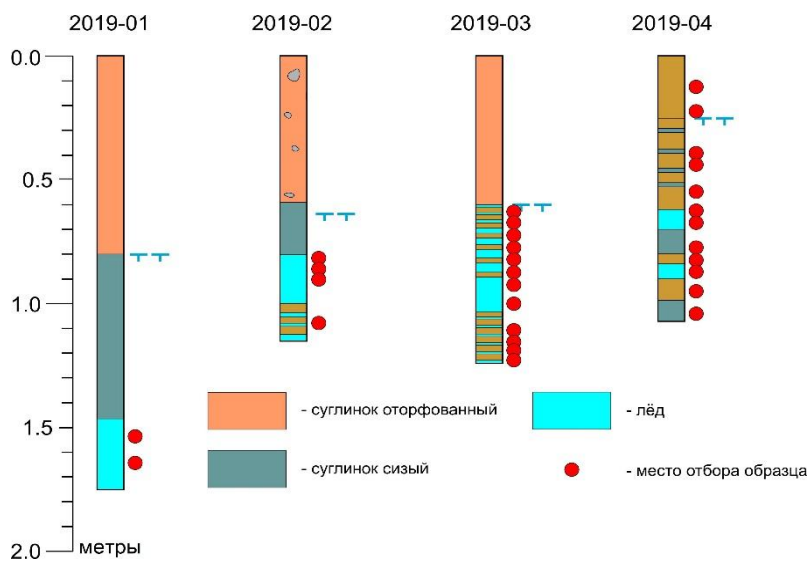


Рис.3. Грунтовые колонки и места отбора проб льда из буровых скважин 2019 года, расположенных вблизи площадок CALM Восточной Чукотки.

Выводы. Результаты неглубокого (0-2 м) бурения сезонноталого слоя и верхнего горизонта многолетнемерзлых пород, проведённого в 2019 году, было сопоставлено с результатами мониторинга глубины сезонного протаивания и понижения поверхности почвы, а также с прогнозными оценками изменения параметров СТС на площадках CALM Восточной Чукотки. Было выявлено, что помимо очевидного тренда к увеличению глубины сезонного протаивания (0,7-1,8 см/год за период 2000-2019 гг.) наблюдается также понижение поверхности почвы со скоростью 2,2 см/год (2012-2019 гг.). Это свидетельствует о более интенсивном понижении кровли многолетнемерзлых пород, чем считалось ранее [Маслаков и др., 2017]. Дальнейшее проведение буровых работ позволит оценить реакцию различных ландшафтов и форм рельефа к дальнейшему опусканию кровли ММП.

Работа была выполнена в рамках гранта РНФ № 19-77-00045 «Восприимчивость многолетнемерзлых пород приморских равнин Восточной Чукотки к современным климатическим изменениям».

ЛИТЕРАТУРА

Бадина С.В. Количественная оценка уязвимости социально-экономического потенциала Российской Арктики в зоне деградации вечной мерзлоты // Региональные исследования. 2017. №. 3. С. 107-116.

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

Кобышева Н.В. Климат России. Санкт-Петербург: Гидрометиздат, 2001. 654 с.

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.

Маслаков А.А. и др. Сезонное протаивание пород в Берингии на фоне современных климатических изменений // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17. №. 4. С. 283-294.

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.

Gruber S. [Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation](#) // The Cryosphere. 2012. N.6. P. 221–233.

Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., Westermann S., Romanovsky V. E., Nelson F.E., Luoto M. [Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century](#) // Nature communications. 2018. Vol. 9(1), 5147.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L. et al. [The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project](#) // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437-470.

Liljedahl A. K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Gross, G., Necsoiu M. [Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology](#) // Nature Geoscience. 2016. Vol. 9(4), 312-318.

Maslakov A. et al. [Permafrost Degradation within Eastern Chukotka CALM Sites in the 21st Century Based on CMIP5 Climate Models](#) // Geosciences. 2019. Vol. 9(5). № 232.

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.

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. P. 65-102.

Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. [Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis](#) // Permafrost and Periglacial processes. 2010. Vol. 21. Is. 2. P. 106-116.

Schuur E.A., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Natali S.M. [Climate change and the permafrost carbon feedback](#) // Nature. 2015. Vol. 520(7546). P. 171-179.

Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Swales T.B., Kokorev V.A. [Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: prognostic assessment based on GCM climate projections](#) // Geographical review. 2017. Vol. 107(1). P. 125-142.

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.

Walvoord M.A., Kurylyk B.L. [Hydrologic impacts of thawing permafrost - A review](#) // Vadose Zone Journal. 2016. 15(6).

DEGRADATION OF ICE-RICH DEPOSITS OF EASTERN CHUKOTKA COASTAL PLAINS DURING CONTEMPORARY CLIMATE CONDITIONS

Maslakov A.A., Komova N.N.

Lomonosov Moscow State University

The study is devoted to assessing the current and forecasted degradation rates of ice-rich deposits and massive ice beds of Eastern Chukotka coastal plains. The dynamics of ALT and soil surface lowering rate were analyzed at the sites for active layer thickness (ALT) monitoring within CALM program (Circumpolar Active Layer Monitoring). An irreversible process of lowering the surface was revealed. It facilitates gully development and the formation of cryogenic landslides. The results of shallow core drilling in the summer of 2019 made it possible to estimate the ice content of near-surface permafrost deposits and to correct the existing forecasts of ALT dynamics in accordance with climate change scenarios.

Keywords: *Chukotka, permafrost, active layer, transient horizon, massive ice, climate change*