

ДИНАМИКА ТЕРМОДЕНУДАЦИИ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ ЗА 2017-2021 ГГ. ПО ДАННЫМ ЕЖЕГОДНОГО МОНИТОРИНГА

¹Тарасевич И.И., ¹Кизяков А.И., ^{2,6}Лейбман М.О., ^{1,3}Письменюк А.А., ^{4,5,6}Нестерова Н.Б.,
²Хайруллин Р.Р., ^{2,6}Хомутов А.В.

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

²Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

³ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт полярных исследований им. А. Вегенера, Потсдам, Германия

⁵Университет Потсдама, Потсдам, Германия

⁶Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Комплекс полевых и дистанционных методов позволил определить скорости роста термоцирков на территории НИС «Васькины Дачи» (Центральный Ямал). Распределение скоростей по периметру отступавшей бровки неравномерно, средние скорости роста трех термоцирков в 2017-2021 гг. изменяются в пределах 5,2–12,5 м/год. Максимальные отмеченные скорости роста составили 52,4 м/год. Отмечено, что динамика роста термоцирков определяется рельефом макросклона, в который врезан термоцирк, а также климатическими колебаниями.

Ключевые слова: *термоденудация, термоцирк, БПЛА, дистанционные методы, ластовый лёд, ортофотоплан, цифровая модель местности, Центральный Ямал*

Потепление климата приводит к увеличению глубин сезонного протаивания и повышению температур мерзлых пород, отмечаемым во многих регионах Арктики [Biskaborn et al., 2019]. В районах широкого распространения подземных льдов, залегающих близко к поверхности, активизируются криогенные процессы, связанные с вытаиванием верхней части высокольдистой толщи. На Центральном Ямале активизируется термоденудация, или комплексная деструкция [Воскресенский, 2001] – совокупность гравитационных и эрозионных процессов, развивающихся на склонах при протаивании высокольдистых отложений [Жигарев, 1975]. Термоденудация приводит к возникновению и дальнейшему росту термоцирков, активность которых циклична и среди прочих природных факторов подвержена влиянию климатических колебаний [Лейбман, Кизяков, 2007].

Наблюдавшаяся летом 2012 г. аномально высокая температура воздуха на Центральном Ямале привела к резкому увеличению глубины сезонного протаивания и активизации термоденудации. В этом же году отмечены массовое формирование новых и активизация старых термоцирков по пластовым льдам. С 2012 г. термоцирки Центрального Ямала являются объектом ежегодного мониторинга, выполняемого Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, в рамках которого оценивается динамика отступления бровок [Khomutov et al., 2017], а также исследуются естественные разрезы мерзлой толщи в стенках термоцирков [Письменюк и др., 2021]. В августе 2021 г. ряд наблюдений был дополнен. По результатам обработки исходных данных получены предварительные выводы [Хомутов и др., 2021]. В настоящем исследовании представлены расширенные результаты обработки материалов многолетнего мониторинга динамики роста трех термоцирков на Центральном Ямале в период с 2017 по 2021 гг.: ТЦ-5, ТЦ-5н и ТЦ-4а.

Исследуемые термоцирки расположены на полигоне научно-исследовательского стационара (НИС) «Васькины Дачи» (рис. 1), в 25 км к юго-востоку от Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Рельеф ключевого участка, предположительно, представлен поверхностью III аллювиально-морской равнины. По данным мозаики высокодетаальной цифровой модели рельефа ArcticDEM [Porter et al., 2018], вершины этого уровня находятся на абсолютных отметках 32-35 м в балтийской системе высот. Склоны сильно переработаны денудационными процессами, характерная крутизна – 6-

14°. Верхняя часть разреза представлена морскими осадками III равнины, перекрытой до глубины 1,8–3,0 м континентальными осадками аллювиального, озерного и склонового генезиса.

За период 2017-2021 гг. осуществлена серия съемок термоцирков с беспилотных летательных аппаратов в июле-августе каждого года. Обработка исходных материалов съемки выполнена в программе Agisoft Metashape Professional [Agisoft..., 2022], по итогам обработки построены 5 цифровых моделей местности и ортофотопланов на территорию ключевого участка с разрешающей способностью от 2,00 до 5,82 см/пиксель. Оценка ежегодных площадей термоцирков проведена путем совмещения разновременных ортофотопланов в ГИС-пакете ESRI ArcGIS. Для оценки скоростей отступления бровок термоцирков применен модуль Digital Shoreline Analysis System [Himmelstoss et al., 2021], используемый при исследованиях отступления морских берегов путем построения трансект через равные по величине отрезки. Модуль также активно применяется при оценке величин отступления бровок термоцирков [Ward Jones et al., 2019; Leibman et al., 2021] – в таком случае трансекты строятся перпендикулярно к огибающей серповидной линии, аппроксимирующей изрезанную в плане форму бровок термоцирка.

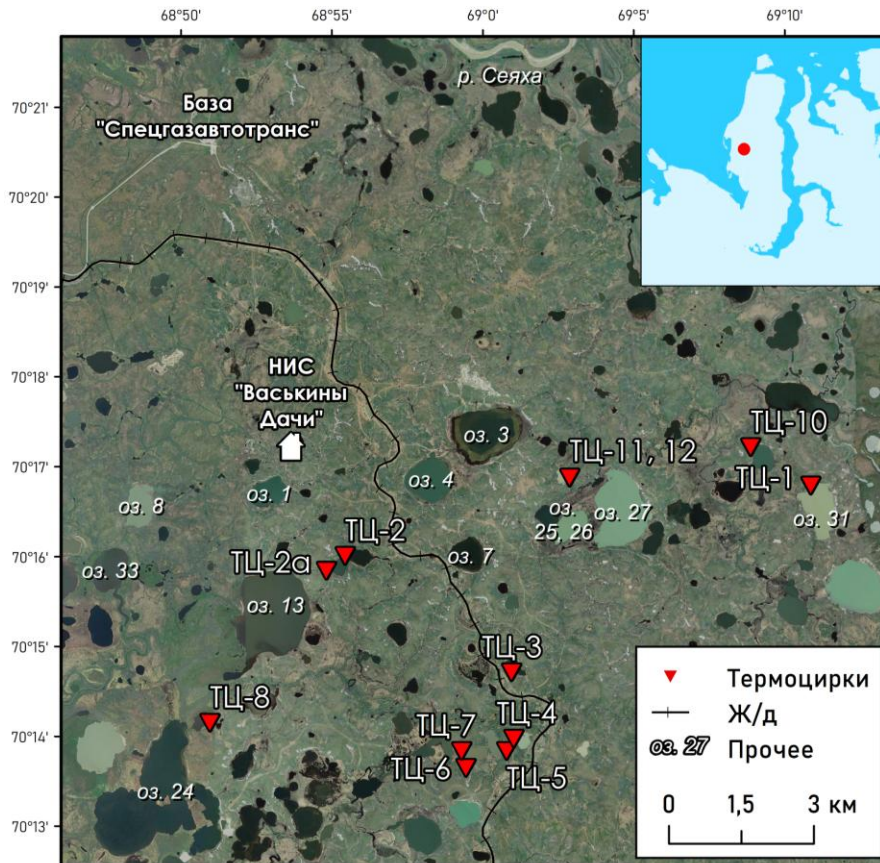


Рис. 1. Район исследования: НИС «Васькины Дачи», Центральный Ямал. Красным цветом отмечены основные изучаемые термоцирки (снимок WorldView-2 от 10.07.2018).

Таким образом, получены численные значения межгодовых скоростей отступления стенки, а также изменения площадей трех термоцирков за период 2017-2021 гг.

Минимальные скорости наблюдались в первый год мониторинга. Средние скорости отступления за период 2017-2021 гг. составили: для ТЦ-5 – 6,1 м/год, для ТЦ-4а – 5,2 м/год, для ТЦ-5н – 12,5 м/год. У всех трех термоцирков наибольшие скорости роста отмечены в период 2019-2020 гг., на теплый период которого приходится повышенное значение суммы положительных температур и осадков теплого периода [Хомутов и др., 2021]. Максимальные скорости роста составили: для ТЦ-5 – 22,4 м/год, для ТЦ-5н – 52,4 м/год (рис. 2), для ТЦ-4а – 17,5 м/год. Отступление стенок термоцирков неравномерно в

пространстве. Пространственные изменения скоростей вдоль отступающих бровок определяются изменчивостью разреза вскрывающихся толщ – наиболее интенсивно бровки отступают на участках с высокой объемной льдистостью разреза. В свою очередь, ТЦ-5 и ТЦ-5н наиболее интенсивно отступают в том направлении, где отмечается наличие выраженных понижений поверхности. Бровки этих термоцирков при этом зачастую сохраняют очертания старых оползневых цирков, затронутых термоденудацией (рис. 2).

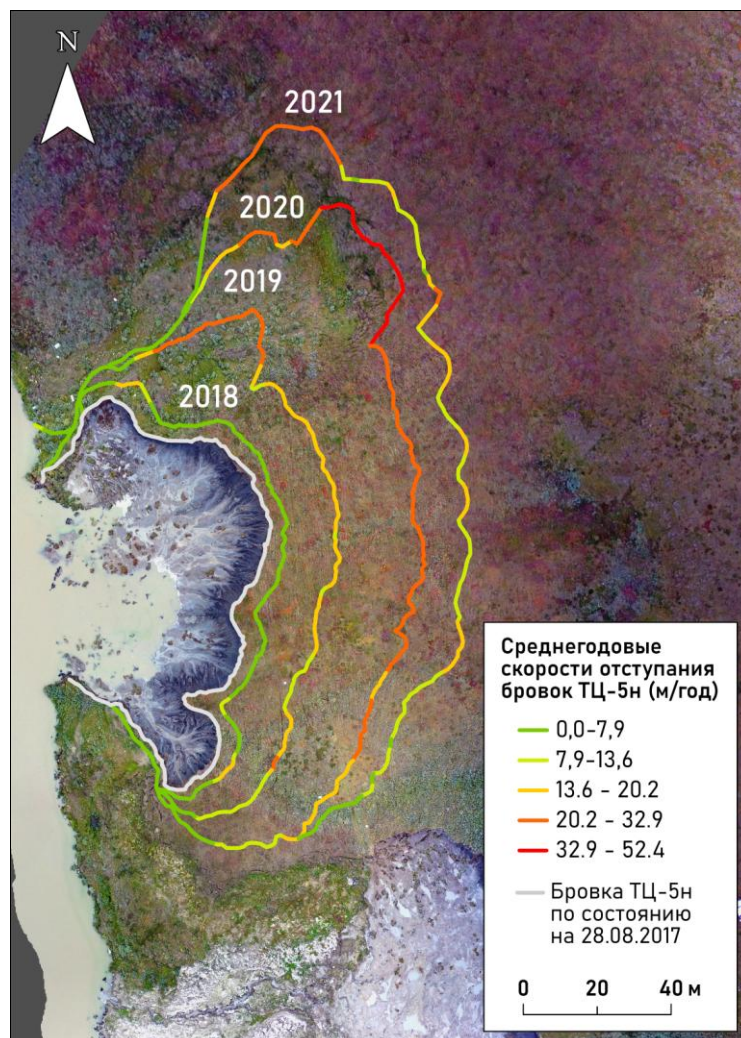


Рис. 2. Среднегодовые скорости отступления бровок ТЦ-5н (в качестве подложки использован ортофотоплан от 28.08.2017).

В результате проведенной работы:

1. Подтверждено, что в период 2017-2021 гг. термоцирки изучаемого района на Центральном Ямале находились в стадии активного роста, темпы которого напрямую зависят от внешних климатических факторов;
2. Выявлены скорости роста трех термоцирков за период 2017-2021 гг., средние скорости отступления бровки составляют 5,2–12,5 м/год. Распределение скоростей по периметру отступавшей бровки неравномерно, максимальные отмеченные скорости роста составили 52,4 м/год;
3. Отмечено, что пространственная изменчивость скоростей роста двух термоденудационных форм на исследуемом участке во многом определяется рельефом склона, в который врезан термоцирк. Наибольшие скорости роста этих термоцирков приурочены к локальным понижениям поверхности – в первую очередь, к старым оползневым циркам. Тем не менее, аналогичной закономерности для третьего термоцирка отмечено не было.

Работа выполнена по теме государственного задания «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0), методические подходы разрабатываются при выполнении работы по теме государственного задания «Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов» (121041600042-7). Снимок WorldView-2 от 10.07.2018 предоставлен Центром коллективного пользования «Геопортал МГУ» (ЦКП УНО «Геопортал с оперативным наполнением и комплексом обучения и обработки информации космических снимков»).

ЛИТЕРАТУРА

Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М.: Изд-во Географического факультета МГУ. 2001. 262 с.

Жигарев Л.А. Термоденудационные процессы и деформационное поведение протаивающих грунтов. М.: Наука. 1975. 110 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы земли СО РАН. 2007. 206 с.

Письменюк А.А., Семенов П.Б., Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Бабкин Е.М., Нестерова Н.Б., Малышев С.А., Стрелецкая И.Д., Шатрова Е.В., Хомутов А.В. Исследования четвертичных отложений и подземных льдов Центрального Ямала // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. №. 8. С. 173–176. doi:10.24412/2687-1092-2021-8-173-176

Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Бабкин Е.М., Данько М.М., Иванов В.И., Королева Е.С., Лейбман М.О., Нестерова Н.Б., Опокина О.Л., Слагода Е.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р. Комплексный мониторинг геокриологических условий и криогенных процессов на севере Западной Сибири // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. №. 8. С. 264–269. doi:10.24412/2687-1092-2021-8-264-269

Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8. Agisoft LLC. 2022. 172 p.

Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J et al. Permafrost is warming at a global scale // Nature communications. 2019. Vol. 10. No. (1). P. 1-11. doi:10.1038/s41467-018-08240-4

Himmelstoss E.A., Henderson E.R., Kratzmann M.G., Farris A.S. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide. US Geological Survey. 2021. 104 p. doi:10.3133/ofr20211091

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations // Advancing Culture of Living with Landslides. Proceedings of World Landslide Forum 4, May 29 – June 2, 2017, Ljubljana, Slovenia, Eds.: K. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa. 2017. V. 5. P. 209-216. doi:10.1007/978-3-319-53483-1_24

Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y., Sonyushkin A., Zimin, M. Coastal Retreat Due to Thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the Last Decade, Update since 2001–2010 // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 20. P. 4042. doi:10.3390/rs13204042

Porter C., Morin P., Howat I et al. ArcticDEM, Version 3. Harv. Dataverse. 2018. doi:10.7910/DVN/OHHUKH

Ward Jones M.K., Pollard W.H., Jones B.M. Rapid initialization of retrogressive thaw slumps in the Canadian high Arctic and their response to climate and terrain factors // Environmental Research Letters. 2019. V. 14. No. 5. doi:10.1088/1748-9326/ab12fd

DYNAMICS OF THERMAL DENUDATION ON CENTRAL YAMAL FOR THE PERIOD OF 2017-2021 ACCORDING TO THE DATA OF ANNUAL MONITORING

¹Tarasevich I.I., ¹Kizyakov A.I., ^{2,6}Leibman M.O., ^{1,3}Pismeniuk A.A., ^{4,5,6}Nesterova N.B.,
²Khairullin R.R., ^{2,6}Khomutov A.V.

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Earth Cryosphere Institute TyumSC SB RAS, Tyumen, Russia

³VNIOkeangeologiya, St. Petersburg, Russia

⁴Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

⁵University of Potsdam, Potsdam, Germany

⁶University of Tyumen, Tyumen, Russia

A complex of field and remote methods made it possible to determine the growth rates of thermocirques (retrogressive thaw slumps) on the territory of the key site Vaskiny Dachi (Central Yamal). The distribution of growth rates along the perimeter of the retreating edge is uneven, the average growth rates of three thermocirques in 2017-2021 vary within 5.2–12.5 m/year. The maximum observed growth rates were 52.4 m/year. It has been noted that the growth dynamics of thermocirques is determined by the relief of the slope into which the thermocirques are embedded, as well as by climatic fluctuations.

Keywords: *thermal denudation, thermocirque, retrogressive thaw slump, UAV, remote sensing, tabular ground ice, orthomosaic, digital surface model, Central Yamal*