

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-175-180



## ВОЗДЕЙСТВИЕ СКЛОНОВЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

✉ Левочкина О.В.<sup>1</sup>, Лейбман М.О.<sup>1</sup>, Тарасевич И.И.<sup>1,2</sup>, Факашук Н.Ю.<sup>1</sup>, Мареев В.А.<sup>1,3</sup>, Хомутов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

✉ levochckina@yandex.ru

Развитие термоденудации по берегам озер приводит к выносу большого количества взвешенного и растворенного вещества в акваторию, что отражается на химическом составе вод, геохимическом и литологическом составе донных отложений. В 2023 г. в районе стационара «Васькины дачи» на Центральном Ямале проводился отбор проб отложений, подверженных термоденудации. Данные по составу этих отложений позволят проанализировать латеральные потоки веществ в системе «водосбор-озеро».

Ключевые слова: *термоденудация, термоцирк, Центральный Ямал, донные отложения*

Озерные отложения являются важным компонентом при реконструкции климатических изменений и условий прошлого. Являясь природным резервуаром, конечной точкой поступления материала из водосборного бассейна, озерные отложения содержат информацию, в том числе, об активности склоновых процессов по берегам озер. Изучение современных, протекающих в настоящее время криогенных склоновых процессов наряду с озерными отложениями, может дать материал для реконструкции циклов активизации этих процессов.

Одним из подобных циклических склоновых криогенных процессов является термоденудация. Активность термоденудации напрямую зависит от климатических флуктуаций, возникая при увеличении глубины сезонного протаивания и достижения ей залежеобразующих льдов или сильнольдистых отложений в пределах склонов [Бабкина и др., 2019]. В результате процесса термоденудации образуются специфические формы рельефа – термоцирки. Термоцирки на Центральном Ямале образуются как правило в пределах водосборных бассейнов озер, и их образование сопровождается латеральным переносом большого количества материала из зоны активности термоцирка напрямую в озера, где этот материал осаждается и становится частью озерной экосистемы.

Несмотря на то, что термоденудация широко распространена на берегах термокарстовых озер, влияние этого процесса на осадконакопление изучено достаточно слабо и зависит от ряда факторов. В первую очередь, сам процесс термоденудации может протекать в различных масштабах и с различной интенсивностью. Также на состав донных отложений влияет изначальный состав выносимых отложений и гидродинамические условия в озере. В донных отложениях термокарстовых озер нередко встречается слой несортированного осадка смешанного состава, который может быть сформирован в результате криогенного оползания [Murton, 1996]. При развитии криогенных оползней течения на склонах в донном осадке встречаются прослойки более грубого материала, сопоставимого с составом отложений, подвергающихся разрушению [Biskaborn, et al., 2013]. Статистический анализ состава отложений, подвергающихся сносу в результате термоденудации, может позволить оценить вклад этих процессов в озерное осадконакопление и выявить их региональные седиментологические характеристики.

Помимо этого, образование термоцирков по берегам озер способствует изменению химического состава озерных вод, концентрации в них органического вещества, приводит к изменению изотопного состава [Факашук и др., 2022]. Анализ этих параметров и в озерной воде, и в водной вытяжке мерзлых и талых отложениях термоцирков может потенциально дать информацию о количестве выносимого осадка, а также их химическом составе. В настоящее время до конца не определена роль термоцирков в формировании и динамике водных экосистем Арктики, поскольку различные регионы характеризуются различными отложениями, слагающими геологический разрез водосборов. Исследования этих процессов позволят выявить связь между химическим составом озерных вод и активностью / цикличностью процессов термоденудации на региональном уровне.

Изучение процесса термоденудации проводится в районе стационара «Васькины дачи» на Центральном Ямале [Лейбман, Хомутов, 2019]. Характерными особенностями этой территории являются наличие залежей пластовых льдов и холмисто-увалистый рельеф, в результате чего в этом районе широко развиты склоновые процессы. Ежегодно в пределах исследуемого района проводится мониторинг динамики развития термоцирков [Хомутов и др., 2017; Тарасевич и др., 2022 и др.], геохимического состава отложений и пластовых льдов, химического состава озер, содержания органического углерода [Дворников и др., 2017; Письменюк и др., 2021; Savvichev et al., 2021; Факашук и др., 2022 и др.].

Исследования последних лет показали, что в результате активизации термоденудации на берегах озер меняется состав вод. Чтобы точнее оценить роль термоденудации как механизма переноса веществ в озерный бассейн, необходимо более детальное изучение содержания исследуемых компонентов в породах, слагающих склоны, и анализ состава донных отложений озер. Геохимический состав отложений в значительной степени определяется их механическим составом [Даувальтер, 2002; Основы геокриологии..., 1996]. Существующая положительная корреляция между уменьшением размера фракций и увеличением концентраций микроэлементов приводит к тому, что тонкозернистый донный осадок является основным местом накопления и переноса органических и неорганических веществ [Даувальтер, 2002]. Таким образом, для количественной оценки вещества, поступающего в озера в результате термоденудации, необходим комплексный анализ состава источника - пород и льдов, слагающих склон, продукта сноса по склону и донных отложений как конечной точки переноса.

Идеальная схема распределения осадков различной размерности в озерах предполагает такое течение процессов сортировки и механического осаждения материала, при котором от периферии бассейна к его центру идет постепенное уменьшение размера частиц, слагающих осадки [Страхов и др., 1954]. В озерах криолитозоны основным источником поступающего материала являются береговые отложения, в качестве механизма переноса вещества выступают криогенные процессы: термоабразия, термоэрозия, термоденудация. Береговые процессы и состав береговых отложений определяют региональные закономерности озерного осадконакопления. В районах, где широко распространена термоденудация, в периоды ее активизации происходит значительное поступление материала в озерный бассейн [Murton, 1996]. В результате блокового смещения пород происходит быстрый перенос вещества в бассейн и формирование несортированного смешанного осадка [Murton, 1996]. В ходе медленного течения пород по склону основное перемещение материала происходит за счет сети струек дождевых или снеговых вод, которые, ввиду своей малой энергии, сносят по склону в основном тонкодисперсные частицы. По мнению И.Д. Данилова [Основы геокриологии..., 1996], этот процесс играет важную роль, т.к. в результате него из приповерхностного слоя вымываются тонкие коллоидные и субколлоидные частицы.

Цель текущей работы - оценка механизма стока материала в термоцирках различной конфигурации на разных стадиях развития, состава пород и вод в системе «водосбор-озеро».

В рамках полевых работ 2023 г. выполнялись задачи по трем направлениям:

1. Мониторинг динамики развития термоцирков. Производилась БПЛА-съемка и наземная GPS-съемка для оценки отступления бровок термоцирков и построения цифровой модели рельефа;
2. Геохимический состав отложений термоцирков, озерных вод и донных отложений;
3. Гранулометрический состав отложений термоцирков и донных озерных отложений.

В пределах исследуемого полигона были произведены работы по трем объектам (термоциркам и оползням) (рис. 1): описание разреза, отбор проб отложений из зачисток, отложений, выносимых по склону, донных отложений озер, проб воды из ручьев и озер. Образцы отложений на склоне отбирались с поверхности по основной наблюдаемой линии стока – увлажненной, лишенной растительности.

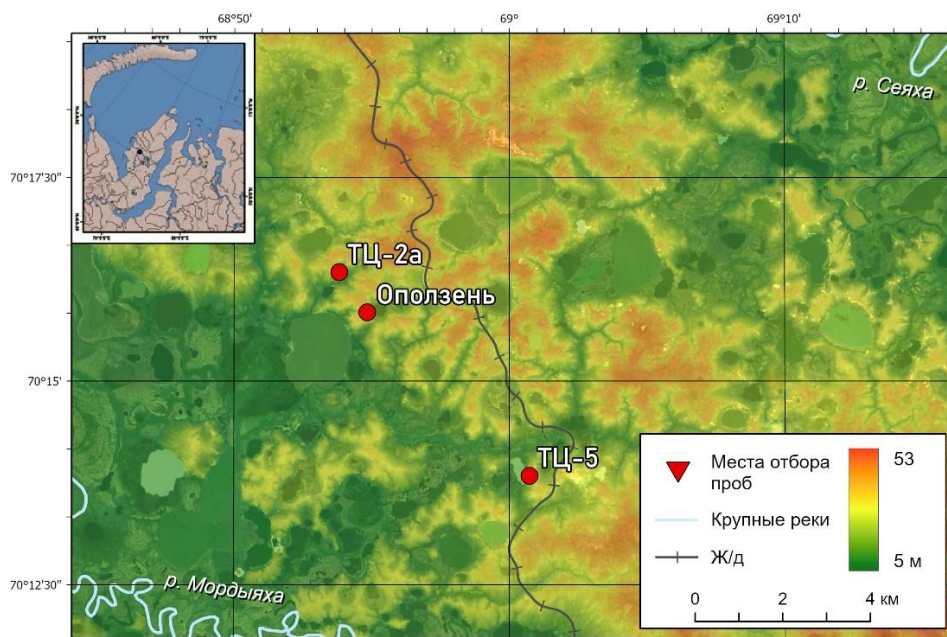


Рис. 1. Схема исследуемого района и участки отбора проб в 2023 г. (рельеф построен по данным ArcticDEM [Porter et al., 2018])

*Термоцирк ТЦ-2а* был описан в 2021 г. [Письменюк и др., 2021], летом 2023 г. обнажения льда и мерзлых пород не наблюдалось. Были отобраны образцы пород из стенки термоцирка, образцы пород с поверхности по линии стока через каждые несколько метров, образец отложений из конуса выноса, донных отложений озера, в которое происходит сток материала, а также образец воды из основного ручья.

*Термоцирк ТЦ-5.* На восточном борту термоцирка вскрывался пластовый лед. Производилась зачистка и описание разреза с отбором проб.

Слой 1. 0 – 10 см. Почвенно-растительный покров.

Слой 2. 10 – 71 см. Супесь коричневато-серая, с пятнами ожелезнения, с бурыми органическими прослоями толщиной 1-3 см, многочисленные включения корней растений. Талая.

Слой 3. 71 – 102 см. Супесь коричневато-серая, однородная. Талая.

Слой 4. 102 – 120 см. Супесь буровато-серая, мерзлая. Выраженная слоистость (от сероватых к буроватым слоям). Криогенная текстура массивная.

Слой 5. 120 см - ... Лед. Чистый, прозрачный, с многочисленными пузырьками. Видимое обнажение мощностью около 40 см, видимая ширина около 1,5 м.

Термоцирк ТЦ-5 находится на удалении от берега озера, и основной сток происходит через ручей. Образцы воды для анализа химического состава были отобраны из ручья и из озера.

*Оползень.* В пределах исследуемого района в 2023 г. был обнаружен эмбриональный криогенный оползень течения, в стенке которого обнажались сильнольдистые мерзлые отложения. На северо-западном борту термоцирка производилась зачистка с описанием криолитологического строения и отбором проб.

Слой 1. 0 – 7 см. Почвенно-растительный покров, корни карликовых березок. Почва темно-бурая, талая.

Слой 2. 7 – 73,5 см. Супесь коричневатая-серая, пластичная, с пятнами ожелезнения, влажность увеличивается сверху вниз по разрезу, многочисленные включения мелких корешков, бурые пятна, линзы толщиной до 1 см. Талая.

Слой 3. 72,5 – 80 см (видимая подошва). Супесь коричневатая-серая, с пятнами ожелезнения, с бурными органическими линзами. Мерзлая. Криогенная текстура линзовидная, толщина шпиров меняется от 0,5 до 5 мм, расстояние между шпиромы 0,5 – 1 см. Многие шпиромы расположены наклонно (влево), под углом 20 – 40 град. Толщина шпиров меняется по глубине. Криогенная текстура послойно:

3.1. 73,5 - 80 см – толстошпировая (толщина 0,3 мм);

3.2. 80 - 83 см – тонкошпировая (толщина до 0,5 мм);

3.3 83 - 111 см – толстошпировая (толщина до 2-3 мм, расстояние между шпиромы 2-3 мм);

3.4 111- (видимая подошва) – линзовидно-слоистая (толщина шпиров - 1 мм, расстояние между шпиромы - 1 мм).

Также производился отбор проб из потока, стекающего по склону, и донные отложения озера, в которое происходит сток материала.

В результате проведенных работ было получено около 30-ти образцов породы, воды и льда. Предполагается получение данных по гранулометрическому составу отложений, определение растворенного органического углерода, ионного состава отложений и других характеристик, которые позволят проанализировать латеральные потоки веществ в системе «водосбор-озеро». Анализ данных гранулометрического состава предполагает построение кривых распределения фракций, расчет статистических параметров: медианного размера частиц, коэффициента сортировки, асимметрии [Рейнек, Сингх, 1981], что позволит выделить количественные характеристики подверженного сносу материала и особенности его распределения в прибрежной зоне.

**Благодарности.** Исследования проводятся при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

## ЛИТЕРАТУРА

*Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А. и др.* Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. №4. с. 99-109.

*Даувальтер В.А.* Факторы формирования химического состава донных отложений озера. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2002. 75 с.

*Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б., Хомутов А.В., Рёсслер С., Губарьков А.А.* Термоденудация на Ямале-источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. №. 2. С. 33-42. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)

*Лейбман М. О., Хомутов А. В.* Стационар «Васькины дачи» на центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. №. 1. с. 91-95. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)

*Основы геокриологии.* Ч. 2. Литогенетическая геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 1996. 399 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. Выпуск 8. С. 173-176. doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-173-176.

Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановки терригенного осадконакопления. Москва: Недра, 1981, 438 с.

Страхов Н.М., Бродская Н.Г., Князева Л.М., Разживина А.Н., Растеев М.А., Сапожников Д.Г., Шишова Е.С. Образование осадков в современных водоемах. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 792 с.

Тарасевич И.И., Кизяков А.И., Лейбман М.О., Письменюк А.А., Нестерова Н.Б., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Динамика термоденудации на центральном Ямале за 2017-2021 гг. по данным ежегодного мониторинга // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 253-257. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-253-257

Факашчук Н.Ю., Дворников Ю.А., Опокина О.Л., Хомутов А.В. Термоденудация как фактор формирования гидрохимии малых тундровых озёр // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 279-284. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-279-284

Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Губарьков А.А., Хайруллин Р.Р. Мониторинг термоденудационных процессов на полуострове Ямал полевыми и дистанционными методами // Современные проблемы географии и геологии. 2017. С. 190-194.

Biskaborn B.K. et al. Thermokarst processes and depositional events in a tundra lake, northeastern Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2013. Т. 24. №. 3. С. 160-174. doi: 10.1002/ppp.1769

Murton J.B. Thermokarst-lake-basin sediments, Tuktoyaktuk Coastlands, western arctic Canada // Sedimentology. 1996. Т. 43. №. 4. С. 737-760. doi: 10.1111/j.1365-3091.1996.tb02023.x

Porter C., Morin P., Howat I. et al., 2018, "ArcticDEM, Version 3", Harvard Dataverse, V1, doi:10.7910/DVN/OHNUKH, last access: summer 2023.

Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Y., Kadnikov V., Kallistova A., Veslopolova E., Chetverova A., Leibman M., Sigalevich P.A., Pimenov N., Ravin N., Khomutov A. The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission // Biogeosciences. 2021. Vol. 18. Is. 9. P. 2791–2807. doi:10.5194/bg-18-2791-2021

## IMPACT OF SLOPE CRYOGENIC PROCESSES ON AQUATIC ECOSYSTEMS OF THE CENTRAL YAMAL PENINSULA

Levochkina O.V.<sup>1</sup>, Leibman M.O.<sup>1</sup>, Tarasevich I.I.<sup>1,2</sup>, Fakashchuk N.Yu.<sup>1</sup>, Mareev V.A.<sup>1,3</sup>,  
Khomutov A.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Earth Cryosphere Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

The development of thermal denudation along the shores of lakes leads to the removal of a large amount of suspended and dissolved matter into the water area, which affects the chemical composition of waters, geochemical and lithologic composition of bottom deposits. In 2023, samples of deposits subject to thermal denudation were collected in the area of the Vaskiny Dacha station in Central Yamal. Data on the composition of these deposits will make it possible to analyze lateral fluxes of substances in the "watershed-lake" system.

Keywords: *thermal denudation, retrogressive thaw slump, Central Yamal, bottom deposits*

## REFERENCES

- Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A.* and others. Activation of cryogenic processes on the territory of Central Yamal as a consequence of regional and local changes in climate and thermal state of rocks // *Meteorology and Hydrology*. 2019. No. 4. With. 99-109.
- Dauwalter V.A.* Factors in the formation of the chemical composition of lake bottom sediments. Murmansk: MSTU Publishing House, 2002. 75 p.
- Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Khaim B., Khomutov A.V., Rössler S., Gubarkov A.A.* Thermal denudation in Yamal is the source of an increase in the concentration of dissolved organic matter in lakes // *Cryosphere of the Earth*. 2017. Vol. 21. No. 2. P. 33-42. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)
- Leibman M.O., Khomutov A.V.* Hospital “Vaskiny Dachas” in central Yamal: 30 years of research // *Cryosphere of the Earth*. 2019. Vol. 23. No. 1. P. 91-95. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)
- Fundamentals of geocryology. Part 2. Lithogenetic geocryology / Ed. E.D. Ershova. M.: Moscow State University Publishing House, 1996. 399 p.
- Pismeniuk A.A., Semenov P.B., Tarasevich I.I., Leibman M.O., Babkin E.M., Nesterova N.B., Malyshev S.A, Streletskaya I.D., Shatrova E.V., Khomutov A.V.* Research of Quaternary sediments and ground ice in central Yamal. Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2021. Issue 8. P. 173-176. doi: 10.24412/2687-1092-2021-8-173-176
- Reineck G.E., Singh I.B.* Environments of terrigenous sedimentation. Moscow: Nedra, 1981, 438 p.
- Strakhov N.M., Brodskaya N.G., Knyazeva L.M., Razzhivina A.N., Rasteev M.A., Sapozhnikov D.G., Shishova E.S.* Formation of sediments in modern reservoirs. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1954. 792 p.
- Tarasevich I.I., Kizyakov A.I., Leibman M.O., Pismeniuk A.A., Nesterova N.B., Khairullin R.R., Khomutov A.V.* Dynamics of thermal denudation on central Yamal for the period of 2017-2021 according to the data of annual monitoring // *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2022. Issue 9. P. 253-257. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-253-257
- Fakashchuk N.U., Dvornikov Yu.A., Opokina O.L., Khomutov A.V.* Thermodenudation as a factor of hydrochemistry formation small tundra lakes // *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*. 2022. Issue 9. P. 279-284. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-279-284
- Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Babkina E.A., Leibman M.O., Gubarkov A.A., Khairullin R.R.* Monitoring of thermal denudation processes on the Yamal Peninsula using field and remote methods // *Modern problems of geography and geology*. 2017. pp. 190-194.
- Biskaborn B.K. et al.* Thermokarst processes and depositional events in a tundra lake, northeastern Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. T. 24. №. 3. C. 160-174. doi: 10.1002/ppp.1769
- Murton J.B.* Thermokarst-lake-basin sediments, Tuktoyaktuk Coastlands, western arctic Canada // *Sedimentology*. 1996. T. 43. №. 4. C. 737-760. doi: 10.1111/j.1365-3091.1996.tb02023.x
- Porter C., Morin P., Howat I. et al.*, 2018, “ArcticDEM, Version 3”, Harvard Dataverse, V1, doi:10.7910/DVN/OHHUKH, last access: summer 2023.
- Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Y., Kadnikov V., Kallistova A., Veslopolova E., Chetverova A., Leibman M., Sigalevich P.A., Pimenov N., Ravin N., Khomutov A.* The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. Is. 9. P. 2791–2807. doi:10.5194/bg-18-2791-2021