Научный совет РАН по криологии Земли

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН

Институт мерзлотоведения СО РАН им. П.И. Мельникова СО РАН

Институт криосферы Земли СО РАН

Ассоциация геокриологов России

«Проблемы криосферы Земли»

Сборник тезисов

Пущино, Россия, 12-16 мая, 2025

КРИОЛИТОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ДИНАМИКА РОСТА БАТАГАЙСКОГО ТЕРМОЦИРКА

Кизяков А.И.[1], Веттерих С.[2], Коротаев М.В.[3], Опель Т.[2], Правикова Н.В.[3], Зимин М.В.[1], Гюнтер Ф.[2], Сыромятников И.И.[4], Шепелев А.Г.[4], Лупачев А.В.[5], Гроссе Г.[2]

[1] Географический факультет, Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[2] Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований имени Гельмгольца, Потсдам, Германия
[3] Геологический факультет, Московский Государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
[4] Институт мерзлотоведении имени П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия
[5] Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия
akizyakov@mail.ru

В последние десятилетия отмечается резкая активизация экзогенных процессов, связанных с таянием мерзлых пород. Одним из наиболее динамичных и ярко проявляющихся в рельефе процессов является термоденудация, связанная с вытаиванием подземных льдов. В комплексе с другими криогенными рельефообразующими процессами термоденудация приводит к образованию специфических форм рельефа – термоцирков и термотеррас, которые могут рассматриваться как криогенно-оползневые формы. В англоязычной литературе для этих форм рельефа, а также и для обозначения процесса их образования, используется термин retrogressive thaw slump. Значительные (как по количеству, так и по морфометрическим характеристикам) проявления термоденудации наблюдаются в районах с распространением мощных залежеобразующих льдов – пластовых и полигонально-жильных.

В Якутии широкое проявление термокарста, а также термоденудации с формированием термоцирков и термотеррас связано с высокольдистыми толщами ледового комплекса. К северу от Янского плоскогорья в окрестностях поселка Батагай расположен крупнейший в мире термоцирк. В 2023 году его поперечник достигал 990 м, площадь собственно чаши термоцирка составляла 682 000 м^2, а с учетом эрозионного вреза, ведущего к реке Батагай, - 876 000 м^2. До конца 1980-х годов на материалах дистанционного зондирования на этом склоне фиксировался линейный эрозионный врез, который с 1991 года стал интенсивно расширяться, приобретая подковообразную в плане форму, характерную для термоцирков.

Проведенные весной 2019 года полевые работы позволили собрать значительный объем данных по строению отложений, вскрывающихся в стенках, и по морфологии термоцирка. В стенках высотой до 55 м вскрывается сложно построенная толща, включающая несколько горизонтов, отличающихся криогенным строением. Наиболее высокие значения суммарной объемной льдистости, достигающие 79-87% характерны для отложений Верхнего и Нижнего ледового комплекса, в которых объем полигонально-жильного льда достигает 55-70%. При этом суммарная льдистость отложений между жилами льда не сильно отличается для отложений Верхнего и Нижнего ледового комплекса, а также Верхнего и Нижнего песка изменяясь от 47 до 57% (Kizyakov et al., 2023).

Изменяющая вдоль бровки термоцирка морфология отступающих стенок и особенности рельефа днища термоцирка в значительной степени определяется криолитологическим строением вскрывающегося разреза, соотношением мощностей выделяемых горизонтов, меняющимся в пространстве. Помимо этого, суточная и сезонная инсоляция льдистых стенок определяет ход как термоденудации, так и эрозионных процессов на дне, обеспечивающих вынос талой водой оттаявшего и обрушившегося со стенок материала. Комплекс факторов криолитологического строения разреза и геоморфологических условий расположения термоцирка, определяют высокие скорости отступания льдистых стенок, достигающие 15 м/год.

В результате совместного анализа полевых данных 2019 года, лабораторных данных о составе жильных льдов и вмещающих пород, а также съемок с БПЛА в 2019 и 2023 годах, ранее выполненных исследований и опубликованных данных создана 3D-модель геологического строения участка склона, где расположен термоцирк (Kizyakov et al., 2024). 3D-модель создана в пакете Petrel (Schlumberger) и включает данные о пространственном распределении горизонтов, отличающихся криолитологическим строением, включением полигонально-жильных льдов; данные о изменчивости в пространстве мощности выделенных горизонтов; а также данные о составе горизонтов, включая характеристики льдистости, гранулометрического состава отложений и содержании органического

углерода. Модель позволяет с высокой точностью оценивать вынос материала с течением времени и эволюцию рельефа термоцирка с оценкой объемного роста чаши термоцирка.

На начальном этапе роста термоцирка в 1990-х годах интенсивно шло расширение чаши и углубление дна по мере того как в стенках вскрывалась верхняя часть разреза до подошвы Верхнего ледового комплекса, когда общая льдистость стенок достигала 81%. Дальнейшее углубление дна и включение в разрез отступающих стенок нижележащих горизонтов привели к снижению общей льдистости стенок до 40-45%.

С 2014 по 2023 годы ежегодный объем оттаивающих и выносимых пород из Батагайского термоцирка составлял около 1 млн м^3. Этот объем на одну треть состоит из талых осадков и на две трети из растаявшего подземного льда. Ежегодно высвобождается около 4000–5000 тонн законсервированного в мерзлоте органического углерода, рассчитанного как сумма общего органического углерода (TOC) отложений и растворенного органического углерода (DOC) подземного льда.

С момента своего образования и до 2023 года в результате отступания стенок за счет комплекса деструктивных процессов из термоцирка вынесен общий объем материала около 34,7 млн м^3, из которых 23,4 млн м^3 были представлены подземным льдом (за счет таяния которого был обеспечен значительный объем воды для транспорта материала и развития эрозии в днище термоцирка) и 11,3 млн м^3 талыми отложениями, включавших в общей сложности около 169500 тонн органического углерода.

Работа выполнена в рамках госзадания МГУ имени М.В. Ломоносова 121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

Kizyakov A.I., Wetterich S., Günther F., Opel T., Jongejans L.L., Courtin J., Meyer H., Shepelev A.G., Syromyatnikov I.I., Fedorov A.N., Zimin M.V., Grosse G. (2023). Landforms and degradation pattern of the Batagay thaw slump, Northeastern Siberia. Geomorphology, 420, 108501. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108501

Kizyakov A.I., Korotaev M.V., Wetterich S., Opel T., Pravikova N.V., Fritz M., Lupachev A.V., Günther F., Shepelev A.G., Syromyatnikov I.I., Fedorov A.N., Zimin M.V., Grosse G. (2024). Characterizing Batagay megaslump topography dynamics and matter fluxes at high spatial resolution using a multidisciplinary approach of permafrost field observations, remote sensing and 3D geological modeling. Geomorphology, 109183, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109183