

## ТЕРМОЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В БАССЕЙНАХ МАЛЫХ РЕК АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЯКУТИИ ВБЛИЗИ ДЕЛЬТЫ Р. ЛЕНЫ

<sup>1</sup>Тарбеева А.М., <sup>2</sup>Ефремов В.С., <sup>2</sup>Лебедева Л.С.

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

Активизация термоэрозионных процессов в последние десятилетия, синхронная с повышением температур воздуха в Арктике, отмечается во многих районах криолитозоны. С целью определения современного состояния, закономерностей динамики и реконструкции истории развития термоэрозионного рельефа материковой части суши в районе дельты р. Лены в 2020 г. проведены полевые исследования, включающие геодезические измерения, аэрофотосъемку и описание разрезов отложений. Выделены термоэрозионные формы рельефа разных рангов: склоновые ложбины стока, термоэрозионные рытвины, овраги и малые долины. Установлена связь особенностей их строения и динамики с рельефом и составом подстилающих пород. Выявлены различия динамики форм в зависимости от их ранга и льдистости подстилающих отложений. Наличие террасы и отложений заполнения в малых долинах позволяют предположить циклический характер термоэрозионных процессов.

Ключевые слова: *термоэрозионные рытвины, овраги, малые долины, термоэрозия, заполнение долин, криолитозона, изменения климата, Северная Якутия, Арктика*

**Введение.** Верхние звенья гидрологической сети чутко реагируют на изменения природных условий, что выражается в чередовании во времени и пространстве этапов врезания, заполнения и стабилизации малых эрозионных форм и долин малых водотоков [Панин и др., 2011а, 2011б]. Арктические регионы не являются исключением. Между тем, история развития и современное состояние термоэрозионного рельефа криолитозоны исследованы очень слабо [Morgenstern, 2020]. Развитие эрозии в криолитозоне имеет определенную специфику. Здесь к механическому выносу вещества добавляется термическое воздействие воды на мерзлые отложения, поэтому процесс получил название термоэрозии [Термоэрозия, 1982]. Активизация термоэрозионных процессов в последние десятилетия, синхронная с повышением температур воздуха в Арктике, отмечается многими исследователями [Bowden, Gooseff et al., 2008; Godin et al., 2010; Perreault et al., 2017], и приводит к увеличению поступления в реки взвешенных и растворенных веществ. Ранее были проанализированы основные закономерности распространения термоэрозионных форм на островах – останцах едомной равнины в дельте р. Лены [Morgenstern et al., 2020]. Целью наших работ является детальная оценка современного состояния и закономерностей современной динамики термоэрозионных процессов в материковой части района дельты р. Лены – на отрогах Хараулахского хребта, а также реконструкция истории развития термоэрозионных форм для оценки их динамики в более продолжительном временном диапазоне.

**Методы.** В рамках полевого сезона 2020 г. проведены описания термоэрозионных форм рельефа в бассейнах ручья Метеорологического и р. Крест-Юрях, расположенных на отрогах Хараулахского хребта, примыкающего к восточной части дельты р. Лены. Для уточнения морфометрических характеристик при помощи квадрокоптера DJI Mavic mini проводилось аэрофотографирование различных форм термоэрозионного рельефа. На основе аэросъемок в программе Agisoft Metashape Professional Version 1.5.2. построены ортофотопланы, ЦМР и поперечные профили через характерные участки форм. Для определения динамики роста оврагов проводились тахеометрические съемки оврагов прибором Sokkia CX-106 с привязкой по опорным реперам. Съемки были сопоставлены с аналогичными съемками, выполненными в 2019 г. Также проводились описания разрезов заполнения долин и склонов долины с отбором проб на радиоуглеродный анализ для определения состава поверхностного слоя отложений, оценки возраста и темпов

аккумуляции наносов. Данные анализов будут получены позже. На основе дешифрирования крупномасштабных космических снимков WorldView-1 (2019 г.) составлена геоморфологическая карта территории, по которой оценивалось распространение термоэрозийных и аккумулятивных форм в бассейне р. Крест-Юрх и на прилегающих малых водосборах.

**Результаты.** Территория в районе дельты р. Лены характеризуется пестрым составом поверхностных отложений с точки зрения льдистости и мехсостава, тем самым определяя особенности развития термоэрозийных процессов. Исследованные бассейны расположены на отрогах Хараулахского хребта. Максимальные отметки водоразделов составляют 171 м, устья рек приурочены к Быковской протоке дельты р. Лены и находятся на высоте около 1 м н.у.м. Вершины водоразделов сложены выходами палеозойских пород (преимущественно алевролитов каменноугольного возраста), которые обнажаются также в руслах водотоков на крутых обрывах, обращенных к Быковской протоке р. Лены. Склоны междуречий выпукло-вогнутые, пологие (до 4-5 град). Верхние части склонов сложены склоновыми супесчаными отложениями, содержащими щебень. Нижние части склонов на высотах от 5 до 50-70 м н.у.м. сложены сильнольдистыми алевритистыми супесями – предположительно ледовым комплексом – едомой [Grosse et al., 2007]. Разрез таких отложений видимой мощностью около 3 м вскрывается в леднике (подземном хранилище) на полярной станции Хабарово, расположенном на отметках около 20 м над у. м. В нем представлены ледовые жилы видимой шириной до 2 м в заполнении из сильнольдистой алевритистой супеси. В верхней части толща оторфована имеет нарушенное строение, в ней наблюдаются обломки древесины. В исследуемых бассейнах ледовый комплекс не имеет большой мощности в связи с близким залеганием скальных пород (они выходят в русле ручья на отметках около 5 м н.у.м.).

Термоэрозийный рельеф исследуемой территории представлен формами разного ранга. Наиболее мелкие – склоновые ложбины стока (также именуемые «делли» и «water tracks»). Второй уровень представляют овраги и термоэрозийные рытвины. Третий уровень – долины рек и ручьев с площадью водосбора от 1 до 50 кв.км.

*Ложбины* – пути стока склоновых вод – распространены на всех пологих (2-5 град) склонах междуречий (Рис. 1а). Их ширина составляет 2-10 м, глубина – около 0,5 м, расстояние между соседними ложбинами – в среднем 30-70 м. Они полностью задернованы, заторфованы, не имеют выраженного тальвега и не несут следов современной эрозии и аккумуляции наносов. Продольный профиль днища ложбины повторяет форму склона. Поверхностный сток в них формируется только в половодье и после обильных осадков [Tarbeeva et al., 2020]. Основным источником питания в межень является таяние сезонно-талого слоя и конденсация. Меженный сток походит в виде подповерхностной фильтрации. В нижней части склона ложбины сливаются между собой и становятся шире. Отмечаются более глубокие участки ложбин ниже старых (не менее 35 лет) проездов техники, что может свидетельствовать об их эрозийном углублении в прошлом.

*Овраги и рытвины* – активно развивающиеся эрозийные и термоэрозийные формы.

Овраги приурочены к верховьям долин малых рек и их притоков, и, как правило, врезаются в древние толщи заполнения долин, не обладающее высокой льдистостью. Овраги образуются при наличии достаточных уклонов в верховьях (Рис. 1б). Глубина оврагов достигает 4-6 м, ширина 15-30 м. Максимальные скорости отступания бровки наблюдались в вершине ручья Метеорологического, имеющего наибольшие уклоны, и составили 1,6 м в год. В днищах оврагов выходят скальные породы, затрудняющие глубинную эрозию. В долинах с малыми уклонами в верховьях овраги не образуются: их истоки представлены деградирующими полигональными торфяниками, по которым развит термокарст (Рис. 1в).

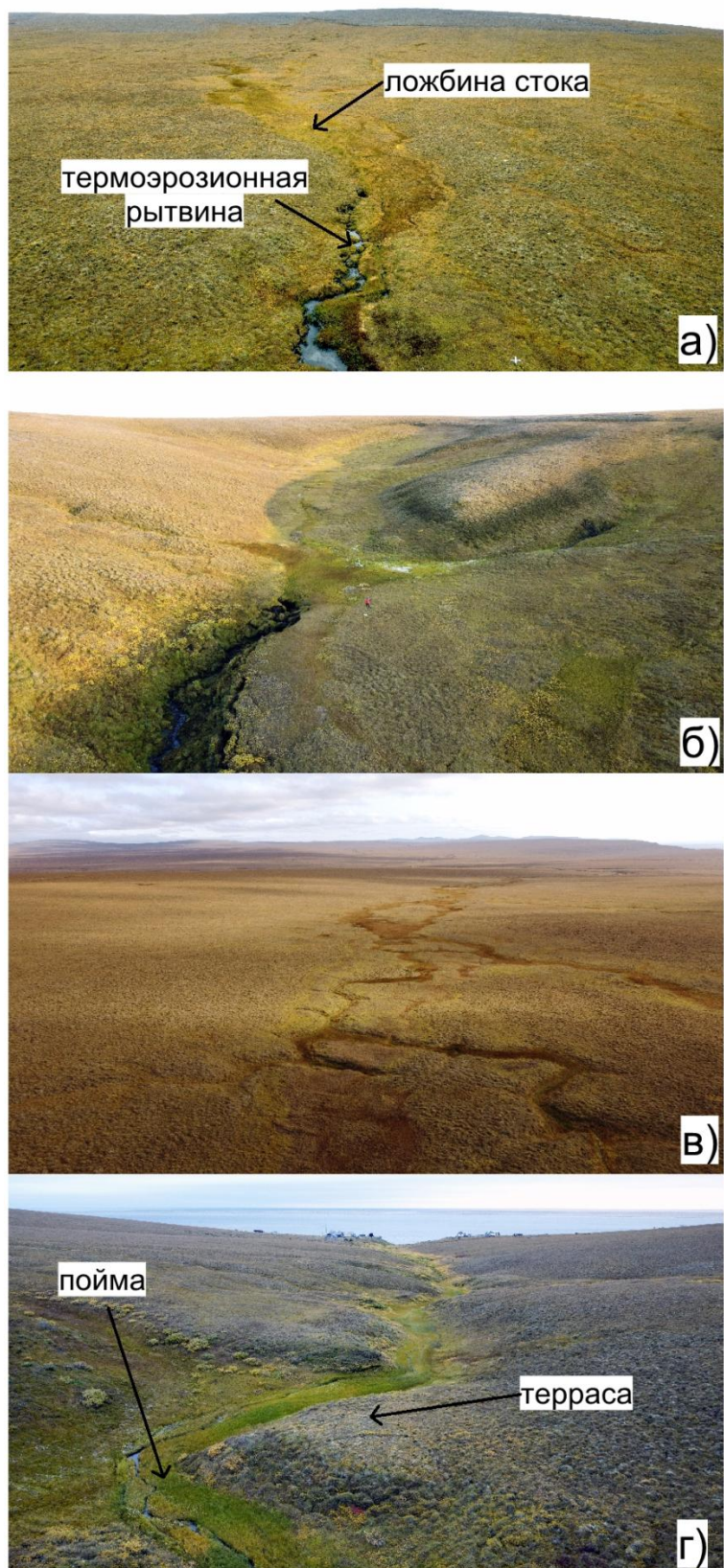


Рис. 1. Термоэрозионные формы разных порядков (снимки с квадрокоптера): а) склоновая ложбина и термоэрозионная рытвина, образовавшаяся в ее нижней части в 2020 г. (бассейн р. Крест-Юрях); б) овраг в верховьях ручья Метеорологического, врезанный в заполнение долины; в) полигональный торфяник в верховьях р. Крест-Юрях; г) долина ручья Метеорологического: современная пойма в днище и терраса (вид вниз по долине)

Термоэрозионные рытвины развиты преимущественно в нижних частях склонов междуречий, сложенных высокольдистыми алевритистыми супесями. Они образуются в результате вытаивания полигонально-жильных льдов, вскрывающихся в их бортах. Глубина рытвины, образовавшейся в 2020 г., не превышает 1-1,5 м, т.к. ограничена выходами скальных пород, ширина ее 1-1,5 м, длина 60 м. В верхней части рытвины отмечается чередование поверхностного и подземного стока за счет образования тоннелей во льду с последующим обрушением кровли. Рытвина образовалась вдоль крупной ложбины стока, концентрирующей воду (Рис. 1а). Под ложбиной, вероятно, протаивание жил уже произошло, тогда как жилы сохраняются на окружающих склонах. Вероятно, рытвина затем заполнится наносами, приведя к увеличению ширины ложбины.

*Долины малых рек и ручьев* отличаются глубоким врезом, повсеместно развитой поймой и широко распространенной террасой (Рис. 1г). Молодая пойма, отложения которой в основном поступают из оврагов в верховьях, имеет ширину от 5 до 30 м высоту до 1,2 м. На некоторых участках среднего течения наносы полностью погребают русло, формируя плоское заболоченное дно долины. Террасы имеют ширину до 15-20 м, высоту 4-5 м в верхнем течении, снижающуюся до 2-2,5 м над урезом в нижнем течении водотоков. В верховьях долин терраса сочленяется с заполнением днища долины, в которое врезан овраг (Рис. 1б). Верхняя часть разреза террасы (на глубину до 1,3 м от поверхности) сложена переслаивающимися супесями с прослоями растительного детрита. Терраса цокольная, в нижней ее части вскрывается едома, подстилаемая скальными породами. Возраст террасы предварительно оценивается нами как голоценовый.

**Обсуждение результатов и выводы.** Наиболее динамичным звеном флювиального рельефа являются термоэрозионные овраги и рытвины, так как первые имеют большие уклоны, а вторые контактируют с высокольдистыми отложениями. Однако динамика этих форм напрямую связана с выше- и нижележащими звеньями флювиальной сети.

Так, образование свежих рытвин нередко отмечается вдоль краевых частей ложбин стока, концентрирующих воду [Bowden, Gooseff et al., 2008]. Основной причиной образования рытвин является вытаивание ледяных жил, поэтому, впоследствии, вероятно, происходит заполнение рытвин рыхлым материалом, выполаживание их склонов и зарастание, благодаря чему, происходит расширение старых ложбин. Не исключено, что ложбины на склонах являются вторичными образованиями – бывшими термоэрозионными рытвинами заполненными наносами и заросшими. Развитие более глубоких ложбин ниже старых проездов техники, вероятно, связано с развитием по ним эрозии по время функционирования дорог (до основания заповедника в 1985 г). Образование свежих термоэрозионных рытвин на разных участках склонов наблюдалось нами в 2018 и в 2020 годах. Учитывая, что годы не являлись аномальным по значениям метеопараметров, можно предположить, что рытвины периодически возникают в разных частях склонов и достаточно быстро заполняются наносами, переходя в ложбины.

Образование оврагов на исследованной территории не носит катастрофического характера (максимальные скорости отступления бровки – 1,6 м в год), так как происходит в террасовых отложениях с невысокой льдистостью. Тогда как в высокольдистых отложениях, например, на острове Байлот [Godin, Fortier, 2010], скорости роста оврагов достигают 390 м в год. Регрессивный рост оврагов приводит к удлинению русла реки. Судя по наличию заполнения долины в верховьях и террасы в нижнем течении, процесс носит циклический характер. Размыв отложений в вершине оврага приводит к аккумуляции наносов в днище долины ниже по течению и ее заполнению. Участки современного заполнения долины вплоть до полного погребения русла наблюдаются в верхнем течении р. Крест-Юрях и на ее притоках. В долинах коротких ручьев, впадающих в р. Лену (например, руч. Метеорологического), развитие оврагов имеет максимальные темпы, но за счет больших уклонов полного погребения русла наносами не происходит: в заполненных наносами днищах долин наблюдаются вторичные врезы. Датирование

отложений поймы и террасы позволят оценить временные рамки активизации термоэрозии в данном районе.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ проекты № 20-05-00840 (А.М. Тарбеева) и 20-35-70027 (В.С. Ефремов; Л.С. Лебедева) в рамках российско-немецкой экспедиции «Лена-2020». Методические исследования выполнены по ГЗ АААА-А16-116032810084-0 (Географический факультет МГУ). Авторы благодарят сотрудников НИС «Остров Самойловский», полярной станции «Хабарово» и Усть-Ленского заповедника за содействие в проведении полевых работ.

## ЛИТЕРАТУРА

Панин А.В., Еременко Е.А., Ковда И.В. Цикл эрозионного расчленения и выполнения эрозионной сети на северо-востоке Ставрополя в конце плейстоцена. Часть I. Ложбинная сеть // Геоморфология. 2011. № 1, С. 77-87.

Панин А.В., Еременко Е.А., Ковда И.В. Цикл эрозионного расчленения и выполнения эрозионной сети на северо-востоке Ставрополя в конце плейстоцена. Часть II. Современные балки. Эрозионная история региона // Геоморфология. 2011. № 2. С. 102-113.

Термоэрозия дисперсных пород. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1982. 194 с.

Bowden W. B., Gooseff M. N., Balsler A., Green A., Peterson B. J., Bradford J. Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems. // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113. G02026, doi:10.1029/2007JG000470

Godin E., Fortier D. Geomorphology of thermo-erosion gullies – case study from Bylot Island, Nunavut, Canada. // Proceedings, 63rd Canadian Geotechnical Conference and 6th Canadian Permafrost Conference. 2010. 1540-1547. 10.13140/2.1.4498.9120.

Grosse G., Schirrmeister L., Siegert C., Kunitsky V.V., Slagoda E.A., Andreev A.A., Dereviagyn A.Y. Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary // Geomorphology. 2007. Vol. 86. P. 25-51. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.005>

Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F., Stettner S., Ramage J., Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Grosse G. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. P. 1–17. <https://doi.org/10.1002/ppp.2087>

Perreault N., Lévesque E., Fortier D., Gratton D., Lamarque L.J. Remote sensing evaluation of High Arctic wetland depletion following permafrost disturbance by thermo-erosion gully processes. // Arctic Science. 2017. Vol. 3. P. 237–253, [dx.doi.org/10.1139/as-2016-0047](https://doi.org/10.1139/as-2016-0047)

Tarbeeveva A., Lebedeva L., Efremov V., Shamov V., Makarieva O. Water tracks in the lower Lena River basin. // E3S Web of Conferences, EDP Sciences (France), 2020. Vol. 163, № 04007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016304007>

**THERMOEROSION IN THE SMALL BASINS OF THE ARCTIC COAST OF  
YAKUTIA NEAR THE LENA DELTA**

<sup>1</sup>*Tarbeeva A.M.*, <sup>2</sup>*Efremov V.S.*, <sup>2</sup>*Lebedeva L.S.*

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

Activation of thermal erosion in recent decades, synchronous with the climate warming in the Arctic, has been noted in many permafrost areas. In order to determine the current state, modern dynamics and the history of thermal erosion, field studies were carried out in 2020 in the vicinity of the Lena Delta, including geodetic measurements, aerial photography and description of sediment outcrops. Thermo-erosional forms of different ranks were identified: slope runoff hollows, thermo-erosional features, gullies and small valleys. The relationship between the peculiarities of their structure and dynamics with the relief and composition of the underlying sediments has been established. Differences in the dynamics of forms depending on their rank and the ice content of sediments are revealed. The presence of a terrace and a valley infill suggests a cyclical nature of the process of thermal erosion.

Keywords: *thermo-erosional features, gullies, small valleys, thermal erosion, valley infill, permafrost, climate change, Northern Yakutia, the Arctic*