

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.345 +551.4.042

РАЙОНИРОВАНИЕ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ ПО ПРОЯВЛЕНИЮ ТЕРМОДЕНУДАЦИИ

А.И. Кизяков¹, И.И. Тарасевич², Л.И. Зотова³, В.И. Гребенец⁴,
В.В. Рогов⁵, Н.А. Костенков⁶, И.Д. Стрелецкая⁷

^{1–7} Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии

¹ Вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alexander.kizyakov@geogr.msu.ru

² Аспирант; e-mail: ilya.tarasevich@student.msu.ru

³ Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: zotlar@mail.ru

⁴ Доц., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: vgreb@inbox.ru

⁵ Проф., д-р геогр. наук; e-mail: rogovic@mail.ru

⁶ Аспирант; e-mail: kostenkov.nikita@mail.ru

⁷ И. о. зав. кафедрой, доц., канд. геол.-минерал. наук; irinastrelets@geogr.msu.ru

Изменения климата в арктическом регионе приводят к активизации криогенных рельефообразующих процессов. В районах с распространением мощных полигонально-жильных и пластовых льдов на севере Евразии и Северной Америки проявляется термоденудация – процесс таяния льдов и льдистых пород, сопровождаемый оползанием оттаявшего материала вниз по склону. Рельефообразующим результатом этого процесса являются термоцирки и термотеррасы. На основе анализа данных дистанционного зондирования Земли с интерактивным дешифрированием и использованием методик машинного обучения создаются глобальные базы данных распространения этих форм рельефа. Публикуемые базы данных предоставляют новые возможности для дальнейшего анализа особенностей проявления в пространстве наблюдаемого явления. Предложено авторское объяснение природных условий и причин, определяющих современное неравномерное распространение термоцирков и термотеррас на полуострове Ямал и их развитие при изменении условий в будущем. В качестве исходных данных использованы опубликованная база данных DARTS с выделенными термоденудационными формами в Арктике, сведения о льдистости верхней части отложений, распространении полигонально-жильных и пластовых льдов и расчлененности рельефа. Для оценки влияния меняющихся мерзлотных условий на активизацию термоденудации использованы данные по изменению температуры пород на глубине 2 м и изменению мощности сезонноталого слоя с 1997 по 2021 г. Установлено, что наличие подземных льдов, залегающих неглубоко от поверхности, является необходимым, но недостаточным условием для формирования термоцирков и термотеррас. Важным фактором для возникновения и продолжительной активности термоденудационных форм является вертикальная расчлененность рельефа, обеспечивающая возможность удаления оттаявшего материала от подножия отступающих стенок к локальному базису эрозии. Авторами выполнено районирование полуострова Ямал по современному проявлению термоденудации. Выделены четыре района, отличающиеся плотностью распространения термоденудационных форм рельефа и прогнозируемым развитием термоденудации. Эти отличия определяются криогенным строением отложений, особенностями рельефа и изменениями мерзлотных условий.

Ключевые слова: Арктика, термоцирк, криогенные процессы, деградация мерзлоты, подземные льды, DARTS

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.80.6.9

ВВЕДЕНИЕ

Изучение криогенных процессов приобретает чрезвычайную актуальность в связи с современными изменениями климата, которые наиболее ярко проявляются в Арктике [Павлов, Малкова, 2010], и интенсивным хозяйственным освоением районов

распространения мерзлых пород. Прогнозируемые изменения климата скажутся на интенсивности рельефообразующих процессов [Кислов и др., 2023]. С таянием подземных льдов связано нарушение поверхности склонов, приводящее к развитию термоденудации. В настоящем исследовании под «тер-

моденудацией» мы понимаем таяние обнаженных льдистых (или вмещающих подземные льды) мерзлых пород под действием тепла воздуха и солнечной радиации и возникающие при этом криогенные склоновые и эрозионные процессы [Жигарев, 1975]. В результате образуются «термоденудационные формы рельефа» (ТФР), включающие термоцирки и термотеррасы, широко представленные на севере Евразии, Северной Америки, Тибете. Отличаясь по морфологии в плане, эти формы имеют отличия и в условиях возникновения [Кизяков, 2005; Кизяков и др., 2006]. В англоязычной литературе термоцирки и термотеррасы объединяются под термином *retrogressive thaw slumps*. Идентификация, оценка динамики, факторов развития и условий распространения этих форм рельефа являются объектом многочисленных исследований как локального, так

и регионального охвата, а также разработки методических подходов к их изучению [Лейбман и др., 2023].

В научных публикациях зачастую используются различные подходы к классификации криогенных процессов и форм рельефа, связанных с их проявлением. Этот момент осложняет сопоставление полученных авторами результатов. Отличия в терминологии и в классификационных подходах в частности проявляются, когда речь идет о процессах, связанных с вытаиванием подземных льдов. Такие процессы либо относятся к термоденудации, а возникающие в их результате формы рельефа называются термоденудационными, либо процессы относятся к криогенным оползням течения и выделяются соответствующие формы рельефа [Лейбман и др., 2023].

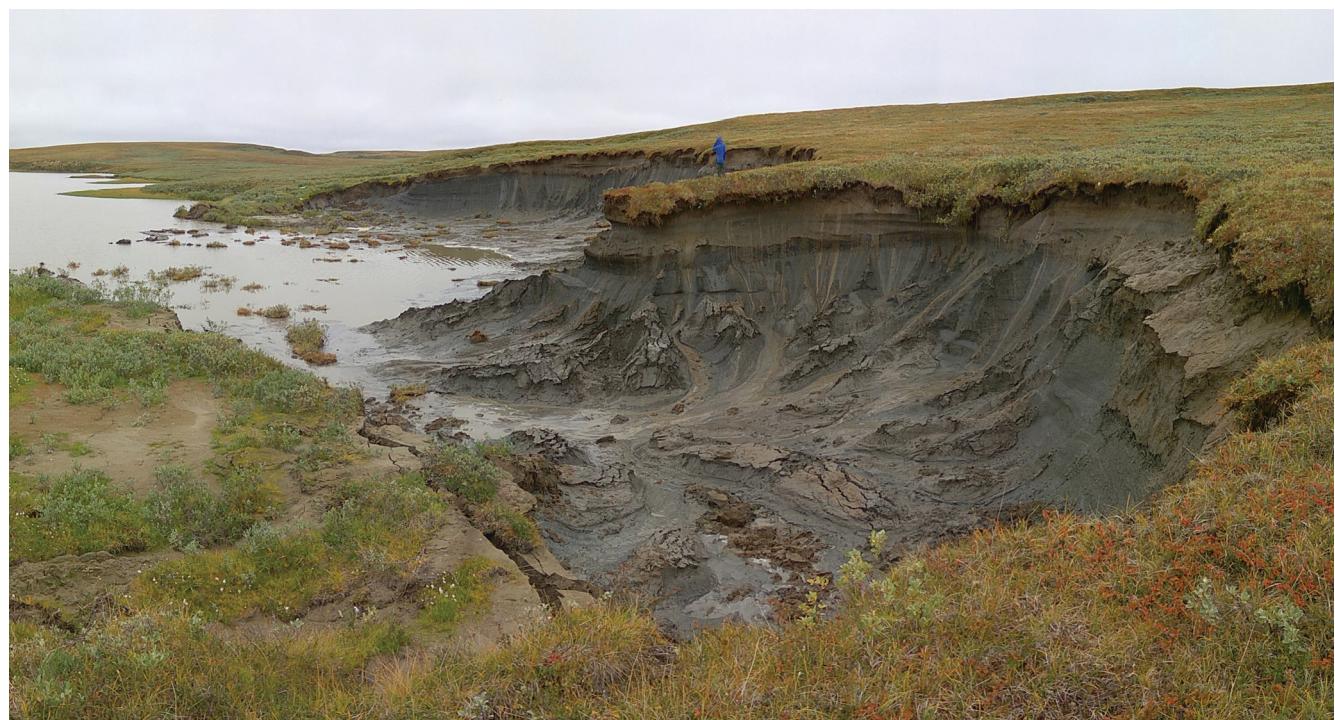


Рис. 1. Термоцирк на берегу озера на Центральном Ямале. В отступающих стенках вскрывается пластовый лед

Fig. 1. Thermocirque on the lake shore in the Central Yamal Peninsula. Tabular ground ice is revealed in the retreating headwalls

Проявление термоденудации на севере Западной Сибири, в том числе на полуострове Ямал, обусловлено распространением сильнольдистых пород и подземных льдов вблизи поверхности. Образующиеся ТФР чрезвычайно динамичны, скорости отступления тыловых стенок достигают первых десятков метров в год. Для изучения динамики их роста традиционно используются как полевые [Кизяков, 2005; Хомутов и др., 2024], так и дистанционные методы с применением радарных и оптических данных косми-

ческой съемки, а также с беспилотных летательных аппаратов [Leibman et al., 2021; Barth et al., 2025]. Развиваются алгоритмы автоматизированного поиска и идентификации термоцирков, в том числе с применением методов машинного обучения, составлены пространственные базы данных распространения ТФР на значительных по географическому охвату территориях севера Евразии и Северной Америки [Witharana et al., 2022; Yang et al., 2025]. Одним из актуальных массивов является база данных DARTS

[Nitze et al., 2025], представляющая собой результат автоматизированного выделения активных ТФР на разновременных космических снимках.

Полученные массивы данных призваны расширить наше представление о процессе термоденудации и представляют важный исходный материал для интерпретации условий распространения ТФР. Для выявления природных закономерностей проявления термоденудации необходим предложенный нами анализ рельефа, криогенного строения верхней части разреза отложений и их температуры.

Цель исследования – охарактеризовать и объяснить пространственное распределение ТФР на полуострове Ямал. В задачи входило: установление связи между распространением ТФР и региональными особенностями состава отложений, их криогенного строения и рельефа; выявление зависимости возникновения ТФР от меняющихся мерзлотных условий.

Районирование полуострова Ямал по проявлению термоденудации помимо научной проблематики имеет также и прикладное применение. Расширяющаяся хозяйственная инфраструктура полуострова, связанная с добычей и транспортировкой углеводородного сырья может оказаться потенциально уязвимой в условиях меняющихся климатических и мерзлотных условий. Береговые терминалы Сабетта, Новый Порт и поселок Сеяха на берегу Обской губы расположены в районах с широким распространением полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), а объекты Бованенковского и Харасавэйского газоконденсатных месторождений – в районах с залегающими вблизи поверхности пластовыми льдами (ПЛ). Для обеспечения безопасного функционирования промышленной инфраструктуры необходима оценка природных воздействий, развития рельефообразующих процессов, в том числе термоденудации.

Природные условия района исследования. Полуостров Ямал представляет собой протяженный меридионально вытянутый массив суши, вдающийся в акваторию Карского моря. Западные берега полуострова омываются Карским морем и водами Байдарапской губы, восточные – Обской губы. Южная сухопутная граница с учетом факторов ландшафтной дифференциации проходит от устья реки Байдараты до створа мыса Салемал по границам водосборных бассейнов [Климанова, Колбовский, 2018].

Четко выраженная широтная зональность арктического и субарктического климатических поясов находит отражение в провинциальных особенностях территории. Согласно ландшафтному районированию Ямало-Ненецкого автономного округа [Козин, 2004], в подзоне северной тундры (рис. 2А), соответствующей Тамбейской подпровинции, рас-

пространены пятнистые тундры, осоково-пушицевые и полигональные болота. Низменные приморские аккумулятивные уровни имеют выровненную поверхность, заболочены, с большим количеством термокарстовых озер. Центральную часть полуострова в зоне типичных тундр занимает Неятская ландшафтная подпровинция с пологоволнистыми расчлененными заозеренными равнинами с мохово-лишайниково-ивнячковыми тундрами и плоскими равнинами с заболоченными пушицево-осоково-моховыми тундрами. В приподнятой части подпровинции доминируют ландшафты высоких холмисто-грядовых расчлененных равнин с ивнячковыми пушицево-моховыми и кустарничково-лишайниково-ивнячковыми тундрами. В подзоне южных тундр в Яратской подпровинции доминируют ивняково-ерниковые кустарничково-лишайниково-моховые тундровые сообщества в сочетании с осоково-сфагновыми, полигональными, реже пушицевыми кочкарными болотами. В Урало-Обской северолесотундровой провинции распространены ерниково-еловые заросли в долинах рек и тундры ерниковые и мохово-лишайниковые на холмах и грядах. В пойменно-долинном комплексе р. Оби преобладают дельтово-островные местности с уроцищами закустаренных прирусловых валов и длительно затапливаемых низин.

Рельеф полуострова ступенчатый, выделяются несколько основных поверхностей, высотные отметки которых меняются в пределах полуострова. В центральной части полуострова их высоты составляют: 60–95 м (V «Салехардская равнина», сложенная морскими среднечетвертичными засоленными песчано-глинистым отложениями салехардской свиты), 40–60 м (IV «Казанцевская равнина», сформированная верхнечетвертичными морскими и прибрежно-морскими засоленными песчано-глинистыми отложениями казанцевской свиты), 25–35 м (III морская равнина, сложенная отложениями морского и лагунно-морского происхождения докаргинского возраста), 15–25 м (II терраса, сложенная морскими, лагунно-морскими, озерными и аллювиальными отложениями каргинского возраста). В полосе побережья и в долинах рек распространена I терраса высотой 7–12 м, сложенная морскими, лагунно-морскими и аллювиальными верхнеплейстоцен-голоценовыми отложениями, а также голоценовые пойма и лайда с высотами 1–5 м над уровнем моря.

В северной половине Ямала мерзлые породы имеют сплошное распространение, в южной – прерывистое (см. рис. 2Б), сквозные талики встречаются под крупными озерами и руслами наиболее крупных рек. В криогенном строении поверхности чехла отложений значительную роль играют дис-

персные отложения с включением сегрегационных льдов, ПЖЛ и залегающие на различной глубине ПЛ [Баду и др., 1982; Дубиков, 2002; Пармузин, Суходольский, 1982; Коняхин, 1992; Соломатин и др., 1993; Стрелецкая, Лейбман, 2002]. В верхней части разреза встречаются эпигенетические и сингенетические ПЖЛ различной ширины и мощности.

Наиболее широко мощные реликтовые неоплейстоценовые сингенетические ПЖЛ распространены в восточной части полуострова [Болиховская, Болиховский, 1996]. В отложениях III и IV уровней на небольших глубинах от поверхности встречаются ПЛ мощностью до 50 м, в них часто проникают нижние части ПЖЛ [Стрелецкая, Лейбман, 2002].

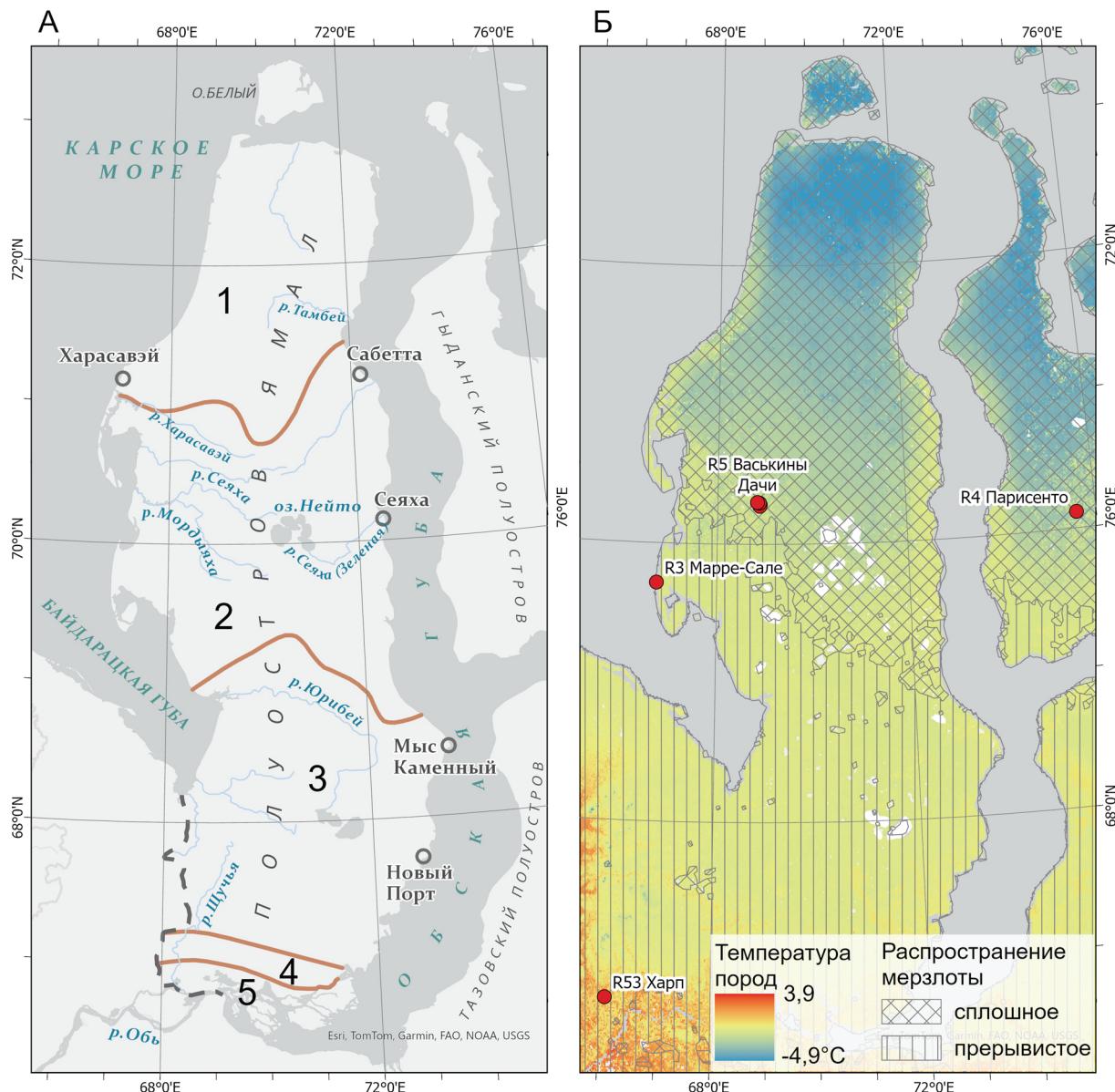


Рис. 2. Природные условия полуострова Ямал:

А – природные зоны и подзоны: 1 – северная тундра; 2 – типичная тундра; 3 – южная тундра; 4 – лесотундра; 5 – пойменно-долинные низины р. Оби. Границы природных зон показаны сплошной линией, прерывистой линией показана южная граница полуострова Ямал [Климанова, Колбовский, 2018]; Б – распространение мерзлых пород с поверхности [Obu et al., 2019] и их расчетная температура на глубине 2 м на 2021 г. [Westermann et al., 2024a]. Точками показаны мониторинговые площадки наблюдения за сезоннотальным слоем программы Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM)

Fig. 2. Natural conditions of the Yamal Peninsula:

A – Natural zones and subzones, numbers are as follows: 1 – northern tundra; 2 – typical tundra; 3 – southern tundra; 4 – forest-tundra; 5 – floodplain and valley lowlands of the Ob River. The boundaries of natural zones are shown by a solid line, and the southern boundary of the Yamal Peninsula is shown by a dotted line [Klimanova and Kolbovsky, 2018]; B – permafrost distribution on the surface [Obu et al., 2019] and their estimated temperature at a depth of 2 m for 2021 [Westermann et al., 2024a]. The dots indicate Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) sites

Температура мерзлых пород на глубине нулевых годовых колебаний находится в диапазоне от $-7\ldots-9$ до $0\ldots-0,5^{\circ}\text{C}$ [Тумель, 2004] в зависимости от ландшафтной приуроченности. Расчетная температура пород на глубине 2 м составляет от $-4,1$ до $0,3^{\circ}\text{C}$ [Westermann et al., 2024a]. Также в зависимости от ландшафтных условий в широком диапазоне меняется мощность сезонноталого слоя (СТС). По данным мониторинговых площадок международной программы Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) (см. рис. 2Б), расположенных в зоне типичной тундры, межгодовая изменчивость СТС на площадке R5 «Васькины Дачи» (Центральный Ямал) составляла 84–114 и 98–133 см – на площадке R3 «Марре-Сале» (Западный Ямал). На расположенной в лесотундре R53 «Харп» с 2016 г. мощность СТС изменялась в диапазоне 90–134 см [CALM..., 2025]. Наблюдения за СТС, проводимые в долине р. Щучьей, в ходе кафедральных учебных практик с 2018 по 2025 гг. показывали стабильные значения на приводораздельных поверхностях и слабый рост оттаивания в пределах овражно-балочных систем.

Особенности рельефа, криогенное строение, льдистость отложений и разнoperиодные колебания климата обусловливают сложившийся набор современных экзогенных процессов, цикличность их активизации. На Центральном Ямале выявлена активизация термоденудации в 2012–2016 гг., связанная с повышением температуры воздуха и увеличением СТС [Babkina et al., 2019]. Резкое увеличение глубины оттаивания запускает процесс деградации сильнольдистой мерзлой толщи и приводит к возникновению новых ТФР и росту старых, давно существующих термоцирков [Тарасевич и др., 2024].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для характеристики типов распространения мерзлых пород использована карта мерзлоты Северного полушария, основанная на результатах моделирования температуры кровли мерзлых пород [Obu et al., 2019]. Для оценки современных изменений мерзлотных условий использовались результаты моделирования температуры пород [Westermann et al., 2024a] и мощности СТС [Westermann et al., 2024b] на основе алгоритма, использующего спутниковые данные MODIS Land Surface Temperature. Эти исходные годовые данные использованы нами для составления картосхем изменений расчетной температуры пород на глубине 2 м и изменения мощности СТС, построенных в пакете ESRI ArcGIS как разность растровых покрытий 2021 и 1997 гг.

Пространственные границы, в рамках которых выполнялся анализ изменений мерзлотных условий, определяются береговой линией полуострова Ямал и острова Белый, южная граница полуострова Ямал

принята в соответствии с подходом на основе ландшафтно-бассейнового моделирования, предложенным О.А. Климановой и Е.Ю. Колбовским [2018].

В качестве исходных данных по распространению и активности процессов термоденудации использовались:

а) опубликованные геоинформационные базы данных о распространении ТФР на Ямале. База данных DARTS [Nitze et al., 2025], представляющая собой результат автоматизированного выделения активных ТФР на серии разновременных мультиспектральных космических снимков PlanetScope с разрешением 3–5 м за 2018–2023 гг. в нескольких регионах, включая полуостров Ямал. Дополнительно привлекались материалы [Нестерова и др., 2021], подтверждающие практически полное отсутствие ТФР на северном Ямале, который не охватывается DARTS;

б) опубликованные материалы многолетнего мониторинга термоцирков на стационаре «Васькины Дачи», расположенном на Центральном Ямале [Babkina et al., 2019; Тарасевич и др., 2024; Хомутов и др., 2024]. Эти данные подтверждают высокую современную активность термоденудации.

Для анализа влияния криолитологического строения разреза на проявление термоденудации использованы данные по льдистости пород за счет текстурообразующих льдов, ПЖЛ и ПЛ [Карта генетических типов..., 1982]. Рассмотрено распределение ТФР и их приуроченность к сочетанию геоморфологических и мерзлотных условий в различных частях полуострова. Вертикальная расчлененность рельефа рассчитана как разность между максимальной и минимальной отметками поверхности в пределах ячейки 1000×1000 м. Данные по высотам поверхности извлекались из ArcticDEM Mosaic [Porter et al., 2018].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате климатических изменений меняются температура мерзлых пород и мощность СТС. В соответствии с широтной зональностью расчетная температура пород на глубине 2 м закономерно увеличивается в южном направлении (рис. 3А). В период 1997–2021 гг. произошло значительное повышение температуры пород в северной и центральной части полуострова, а также на восточных и западных прибрежных участках, где отепляющее влияние оказывают водные акватории (см. рис. 3А). В этих же районах увеличивается и расчетная глубина оттаивания (см. рис. 3Б).

Изменения температуры пород и СТС в южной части полуострова в пределах южной тундры и лесотундры незначительны, это связано с изолирующей ролью более мощного мохового и торфяного

покровов и более плотной кустарничковой растительностью, через которые изменения температуры на поверхности передаются в толщу мерзлоты [Конищев, 2009]. На севере Ямала важнейшим компонентом криогенного строения является льдистый переходный слой, защищающий расположенные ниже мерзлые породы от пропаивания.

На территории Ямала области массового распространения ТФР приурочены к подзонам типич-

ной тундры, южной части северной тундры и северной части южной тундры (рис. 4А). В пределах этой широтной полосы массовое распространение ТФР ограничено в более узком диапазоне от 67,7 до 71,5° с. ш. На южном Ямале (на большей части южной тундры и лесотундры) плотность ТФР существенно ниже центральных районов, а на северном Ямале в пределах северной тундры ТФР практически отсутствуют за исключением единичных форм.

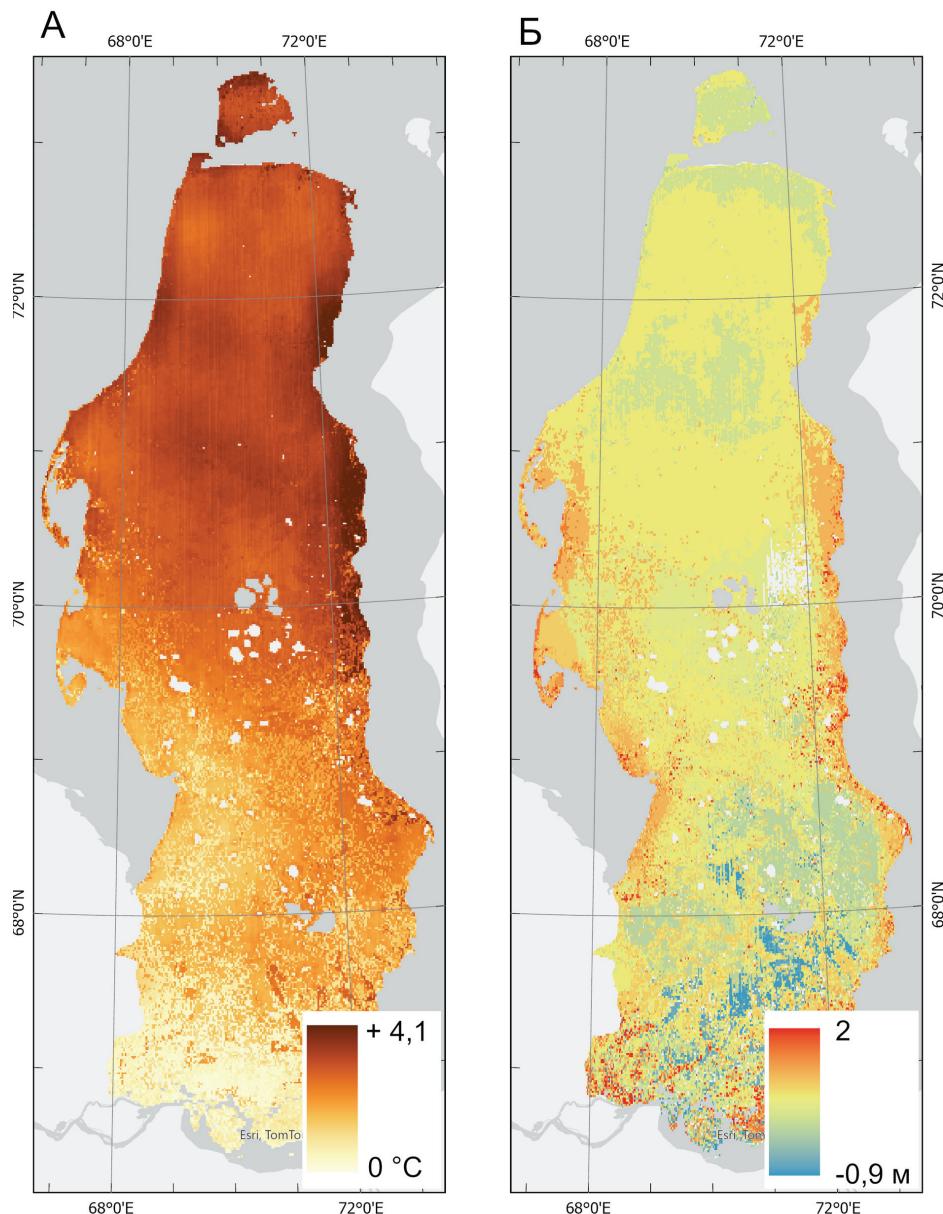


Рис. 3. Изменения мерзлых условий на полуострове Ямал с 1997 по 2021 г.:

А – изменение расчетных величин температуры пород на глубине 2 м [построено по данным Westermann et al., 2024a], области с положительными значениями характеризуют районы с повышением температуры пород; Б – изменение расчетной мощности СТС [построено по данным Westermann et al., 2024b], области с отрицательными значениями характеризуют районы с сокращением СТС, области с положительными значениями – увеличение СТС

Fig. 3. Changes in permafrost conditions on the Yamal Peninsula from 1997 to 2021:

А – change in estimated ground temperatures at a depth of 2 m [based on Westermann et al., 2024a]; areas with positive values characterize regions with increasing ground temperatures; Б – change in estimated active layer thickness [based on Westermann et al., 2024b], areas with negative values characterize regions with decreasing active layer thickness, and areas with positive values indicate its increase

Участки с высокой плотностью ТФР расположены в западной части Центрального Ямала в районах с широким распространением неглубоко залегающих ПЛ и значительной глубиной расчленения рельефа в диапазоне 20–40 м. Повышенные значения плотности ТФР приурочены к бассейнам рек Сеяха и Мордыяха.

Как показывает наш опыт, существующие методы машинного обучения пока дают некоторое количество ложных срабатываний, когда за термоцирк принимается участок оголенного грунта, небольшое озерко, эрозионное или прислоновое понижение с летующим снежником. Соответственно, для таких наборов данных требуется их экспертная заверка и подтверждение полевыми материалами или другими источниками информации. Тем не менее, совершенствование этого подхода имеет огромный потенциал при оценке распространения и картографирования проявлений различных рельефообразующих процессов.

Несмотря на возможные ошибки выделения ТФР в используемой базе данных [Nitze et al., 2025], полученный результат отражает общие региональные закономерности распространения явления в масштабе полуострова. Основываясь на этих данных, нами выделены характерные районы сгущения проявлений термоденудации и объяснены закономерности их распространения исходя из природных условий региона. Наблюдения на Центральном Ямале [Тарасевич и др., 2024; Хомутов и др., 2024] подтверждают достоверность выделения района высокой концентрации ТФР на этом ключевом участке.

На рис. 4А выделены четыре района, в различной степени затронутые термоденудацией. С целью объяснения причин выявленной неоднородности распространения ТФР в пределах природных зон и подзон в схожих условиях по льдистости пород построена картосхема вертикальной расчлененности рельефа (см. рис. 4Б).

Распространение ТФР по широте ограничено подзоной типичной тундры и прилегающих частей подзон северной и южной тундры. Наблюдается асимметрия в распространении ТФР с запада на восток полуострова. Подавляющее большинство ТФР находится к западу от меридиональной оси полуострова Ямал, проходящей по наиболее возвышенным участкам и являющейся водоразделом для бассейнов рек, текущих на запад к Карскому морю и на восток к Обской губе. Область с высокой концентрацией ТФР расположена на западном макросклоне ступенеобразно понижающихся на запад террасовидных поверхностей. Приуроченность термоцирков к склонам западной экспозиции выявлена и на ключевом участке Центрального Ямала на НИС «Васькины Дачи» [Тарасевич и др., 2024]. Наиболее возвышенные участки в центральной части полуострова с большим перепадом высот (фрагменты V «Салехардской равнины») характеризуются невысокой концентрацией

ТФР, что объясняется отсутствием неглубоко залегающих ПЛ в верхней части разреза.

Поверхности III морской равнины наиболее поражены термоденудацией на всем полуострове Ямал. Важнейшей особенностью криолитологического строения разреза этого геоморфологического уровня является залегание ПЛ вблизи поверхности. Широкое распространение ТФР в пределах III морской равнины подтверждено полевыми наблюдениями на Центральном Ямале [Тарасевич и др., 2024]. Установлены появление новых термоцирков в период 2009–2023 гг. и высокие темпы роста площадей термоцирков, коррелирующие с межгодовыми вариациями летних температур воздуха.

Благоприятным фактором активного роста ТФР является расчлененный рельеф, обеспечивающий достаточную энергию для склоновых и эрозионных процессов. Нарушение стабильности склонов характерно для размываемых за счет волновой и термической абразии береговых уступов озер и морей, а также для размываемых речных берегов. Отступание береговой линии способствует постоянной перестройке продольного профиля эрозионных форм в днищах ТФР, привязанных к этому подвижному базису эрозии. Сохранение достаточно короткого расстояния между отступающими стенками ТФР с подземным льдом и водным объектом, в который происходит разгрузка выносимого материала, обеспечивает возможность продолжительного существования и высоких темпов роста ТФР на берегах морей, озер и рек.

Закономерности формирования и пространственного распределения льдистости за счет льда цемента и шлирового льда, а также крупных залежей подземных льдов хорошо изучены только для верхней 10–15 м толщи мерзлых пород Западной Сибири (см. рис. 4А). На севере и северо-западе Ямала преобладают сильнольдистые породы с льдистостью за счет льда-цемента и шлирового льда (L_1) более 0,4 и с высокой льдистостью за счет ПЖЛ (L_2) от 0,05 до 0,2; на глубине ниже 5 м от поверхности встречаются ПЛ. Распределение льдистости в центральной части Ямала более мозаичное. Относительно невысокая льдистость L_1 характерна для пород, слагающих наиболее высокие геоморфологические уровни. В пределах равнины Салехардского возраста породы льдистые за счет текстурообразующих льдов, ПЖЛ распространены не широко и имеют небольшие размеры. Для более низких поверхностей увеличивается макрольдистость за счет крупных ПЖЛ и неглубоко залегающих ПЛ. Сохраняется сильная льдистость L_1 более 0,4 в дисперсных отложениях до самых южных районов. На юге Ямала макрольдистость толщ снижается за счет частичного вытаивания залегающих близко к поверхности ПЛ и ПЖЛ в прошлые более теплые эпохи.

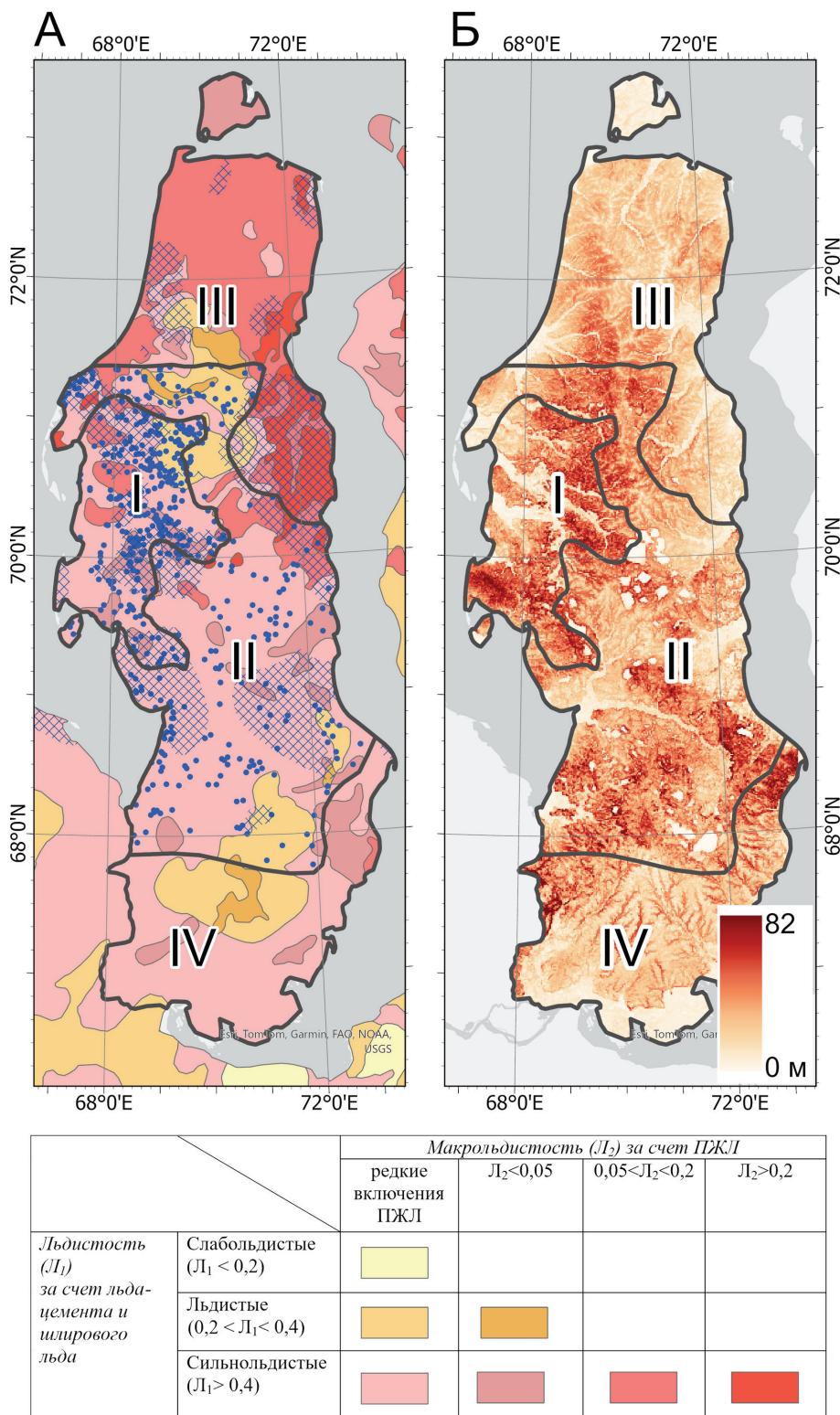


Рис. 4. Неравномерность распространения ТФР на полуострове Ямал и ее связь с льдистостью отложений и вертикальной расчлененностью рельефа. Римскими цифрами I–IV обозначены выделенные районы распространения ТФР: А – точки ТФР [Nitze et al., 2025] на картосхеме льдистости отложений [Карта генетических типов..., 1982], объяснение градации льдистости по цвету приведены в таблице, широкое распространение ПЛ показано штриховкой; Б – вертикальная расчлененность рельефа. Насыщенные цвета характеризуют районы с большим перепадом высот

Fig. 4. The uneven distribution of thermal denudation landforms on the Yamal Peninsula and its relation to the ice content of permafrost and vertical surface dissection. I–IV indicate the designated areas of thermal denudation landforms distribution: A – landforms points [Nitze et al., 2025] on the map of ice content [Map of genetic types..., 1982]. The explanation of the color gradation of ice content is given in the table, the areas with widespread distribution of tabular ground ice are shown by hatching; B –vertical surface dissection. Intense colors characterize areas with high elevation differences

Льдистость разреза за счет текстурных льдов (L_1) и ПЖЛ (L_2) не оказывает значимого влияния на развитие ТФР для большей части восточной и северной части Ямала. В этих районах распространены преимущественно низкие геоморфологические уровни и характерна невысокая (2–20 м) вертикальная расчлененность рельефа (см. рис. 3Б). На побережье Обской губы между устьями рек Сеяха (Зеленая) и Тамбей (с вертикальной расчлененностью рельефа 2–12 м) ТФР представлены очень ограниченно, в основном на II аллювиально-морской террасе, сложенной сильнольдистыми полигенетическими песчаными толщами с ритмичным переслаиванием оторфованных и минеральных пачек. Льдистость этих отложений (L_1) нередко доходит до 0,45–0,6. Развиты мощные ПЖЛ (L_2 более 0,2), достигающие 15–16 м по вертикали [Васильчук и др., 1989], ниже по разрезу залегают ПЛ. Повышение температуры пород и увеличение СТС приведет к фронтальной термоденудации – термической просадке поверхности, образованию термокарстовых понижений. Оттаивание верхних частей ПЖЛ способствует активизации термоэрозии и расширению сети мелких эрозионных форм, развивающихся по сети морозобойных полигонов.

Продолжающееся потепление климата и увеличение мощности СТС приведет к возникновению новых ТФР на участках близкого к поверхности залегания подземных льдов. В условиях повышения температур мерзлых пород появление ТФР вероятно на севере Ямала, где в настоящее время незначительное сезонное протаивание, а расположенные вблизи поверхности льдистые мерзлые породы ранее не были затронуты термоденудацией и термокарстом. Также ожидается появление новых и рост существующих ТФР в зоне типичных тундр, где увеличивающееся оттаивание затронет более глубоко расположенные подземные льды.

По проявлению термоденудации выделены четыре района и сделан прогноз развития процесса при продолжающемся потеплении климата в регионе:

I – наибольшая современная концентрация ТФР в подзоне типичной тундры, где повышение температур и увеличение мощности СТС способствуют вытаиванию ПЛ, а переходный слой значительно деградировал. Преобладают участки с вертикальной расчлененностью рельефа 20–40 м. Прогнозируется появление новых, рост активных термоцирков и цикл активизации термоцирков, которые сейчас находятся в стадии стабилизации;

II – высокие концентрации ТФР в подзонах типичной и южной тундры. В типичной тундре прогнозируется возникновение новых ТФР при благоприятных локальных условиях, включающих неглубокозалегающие подземные льды и значи-

тельную (10–25 м) вертикальную расчлененность рельефа. В южной тундре возникновение новых ТФР маловероятно, возможно только в случаях увеличения СТС до более глубоко залегающих ПЛ;

III – ТФР практически отсутствуют, ожидается их появление в северотундровой подзоне при повышении температуры пород и увеличении мощности СТС. В краткосрочной перспективе состояние поверхности северных тундр будет относительно стабильным, активизации ТФР не ожидается, поскольку мощный сильнольдистый и низкотемпературный переходный слой защищает залегающие ниже ПЛ и реликтовые ПЖЛ. На восточном побережье Ямала слабая вертикальная расчлененность рельефа (2–12 м) даже в условиях присутствия мощных ПЖЛ не приведет к образованию ТФР. Ожидается активизация термической просадки мерзлых пород, формирование термокарстовых котловин;

IV – отсутствие ТФР на юге Ямала связано с тем, что в основном неглубоко залегающие подземные льды вытали, активный период формирования ТФР в прошлом. Отепляющее влияние снега приводит к глубокому оттаиванию и обновлению старых форм, но это скорее исключение, чем закономерность. Появление новых ТФР мало ожидаемо.

ВЫВОДЫ

Неоднородность распространения ТФР на полуострове Ямал определяется комплексом ландшафтно-мерзлотных условий, включающих рельеф поверхности, криогенное строение и льдистость отложений, температуру мерзлых толщ и глубину СТС.

Высокая льдистость дисперсных отложений и присутствие неглубоко залегающих залежеобразующих подземных льдов являются необходимым, но недостаточным условием для проявления термоденудации. Значительная вертикальная расчлененность поверхности и активность эрозионных и гравитационных процессов способствуют вскрытию кровли подземных льдов и запускают развитие термоденудации. Малый перепад высот является неблагоприятным фактором для возникновения ТФР.

Отсутствие ТФР в ряде районов с высокой льдистостью отложений, в частности на участках распространения сильнольдистых пород и реликтовых сингенетических ПЖЛ на восточном побережье Ямала между реками Сеяха (Зеленая) и Тамбей, объясняется распространением низких слабо дренированных поверхностей с незначительным вертикальным расчленением рельефа. В этих условиях протаивание мощных ПЖЛ приводит к термической просадке (термокарсту) без образования ТФР.

Высокая концентрация современных ТФР в центрально-западной части Ямала связана с благопри-

ятным сочетанием широкого распространения ПЛ, залегающих вблизи поверхности, увеличения слоя оттаивания и значительной расчлененности рельефа.

В условиях прогнозируемого потепления климата в Арктике усиление деятельности термоэрозии, термоабразии, термоденудации и склоновых процессов, нарушающих стабильность склонового чехла и удаляющих материал от подножия склонов, приведут к появлению новых ТФР на берегах морей, озер и рек.

Увеличение СТС приведет к появлению новых ТФР на склонах приводораздельных поверхно-

стей в районах, где кровля подземных льдов находится вблизи современной подошвы СТС. Растворящие годовые суммы положительных температур воздуха способствуют увеличению скоростей роста существующих ТФР и появлению новых. С точки зрения ожидаемой активизации термоденудации наиболее опасными для хозяйственной инфраструктуры являются районы, расположенные в подзонах типичной и северной тундры с высокой льдистостью отложений за счет ПЖЛ и ПЛ и увеличивающейся глубиной сезонного оттаивания.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы НИР 121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баду Ю.Б., Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К.* Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, 1982. С. 13–24.
- Болиховская Н.С., Болиховский В.Ф.* Палеогеографические условия континентального синкриогенеза на центральном Ямале // Материалы Первой конференции геокриологов России. Т. 3. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 9–15.
- Васильчук Ю.К., Трофимов В.Т., Баду Ю.Б.* Восточно-Ямальская область // Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. С. 172–180.
- Дубиков Г.И.* Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 246 с.
- Жигарев Л.А.* Термоденудационные процессы и деформационное поведение протаивающих грунтов. М.: Наука, 1975. 110 с.
- Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000 / гл. ред. В.Т. Трофимов. М.: Центргеология, 1982.
- Кизяков А.И.* Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2005. Т. 9. № 1. С. 63–67.
- Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д.* Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 2. С. 79–89.
- Кислов А.В., Аляутдинов А.Р., Баранская А.В. и др.* Прогноз изменений климата и интенсивности экзогенных процессов на территории Ямало-Ненецкого автономного округа // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 2. С. 233–240.
- Климанова О.А., Колбовский Е.Ю.* Физико-географическое районирование как метод делимитации границ полуостровов (на примере полуостровов Ямал и Гыданский) // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 82–88. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14082.
- Козин В.В.* Ландшафтное районирование // Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / под ред. С.И. Ларина. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. С. 221.
- Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2009. № 4. С. 10–20.
- Коняхин М.А.* Подземные льды и динамика криогеосистем // Геоэкология Севера. М.: МГУ, 1992. С. 43–50.
- Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б. и др.* Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза // Проблемы Арктики и Антарктики. 2023. Т. 69. № 4. С. 486–500. DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500.
- Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О. и др.* Инвентаризация термоцирков на севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 6. С. 41–50. DOI: 10.15372/KZ20210604.
- Павлов А.В., Малкова Г.В.* Динамика криолитозоны России в условиях современных изменений климата XX–XXI веков // Известия РАН. Серия географическая. 2010. № 5. С. 44–51.
- Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е.* Пластовые льды Среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, 1982. С. 51–61.
- Соломатин В.И., Коняхин М.А., Николаев В.И. и др.* Условия залегания и состав пластовых льдов на полуострове Ямал // Материалы гляциологических исследований. 1993. № 77. С. 139–147.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О.* Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2002. Т. 4. № 3. С. 15–24.
- Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Кизяков А.И. и др.* Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 3. С. 391–411. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-3-391-411.
- Тумель Н.В.* Многолетнемерзлые породы // Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа / под ред. С.И. Ларина. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. С. 156–157.
- Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р. и др.* Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. // Проблемы

- Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 2. С. 222–237. DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237.
- Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Y.A. et al. Activation of Cryogenic Processes in Central Yamal as a Result of Regional and Local Change in Climate and Thermal State of Permafrost, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, p. 283–290, DOI: 10.3103/S1068373919040083.
- Barth S., Nitze I., Juhls B. et al. Rapid changes in retrogressive thaw slump dynamics in the Russian High Arctic based on very high-resolution remote sensing, *Geophysical Research Letters*, 2025, vol. 52, iss. 7, e2024GL113022, DOI: 10.1029/2024GL113022.
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y. et al. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, Update since 2001–2010, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 20, 4042, DOI: 10.3390/rs13204042.
- Nitze I., Heidler K., Nesterova N. et al. DARTS: Multi-year database of AI-detected retrogressive thaw slumps in the circum-arctic permafrost region, *Scientific Data*, 2025, no. 12, 1512, DOI: 10.1038/s41597-025-05810-2.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 193, p. 299–316, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
- Witharana C., Udawalpola M.R., Liljedahl A.K. et al. Automated Detection of Retrogressive Thaw Slumps in the High Arctic
- Using High-Resolution Satellite Imagery, *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 17, 4132, DOI: 10.3390/rs14174132.
- Yang Y., Rodenhizer H., Rogers B.M. et al. A Collaborative and Scalable Geospatial Data Set for Arctic Retrogressive Thaw Slumps with Data Standards, *Scientific Data*, 2025, vol. 12, 18, DOI: 10.1038/s41597-025-04372-7.

Электронные ресурсы

- CALM North Summary Data Table. Circumpolar Active Layer Monitoring Network, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (дата обращения 01.09.2025).
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. ArcticDEM, Version 4.1, Harvard Dataverse, V1, 2018, DOI: 10.7910/DVN/3VDC4W (дата обращения 02.09.2025).
- Westermann S., Barboux C., Bartsch A. et al. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Ground Temperature for the Northern Hemisphere, v 4.0, NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2024a, DOI: 10.5285/20ec12f5d1f94e99aff2ed-796264ee65 (дата обращения 15.08.2025).
- Westermann S., Barboux C., Bartsch A. et al. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost active layer thickness for the Northern Hemisphere, v 4.0. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 2024b, DOI: 10.5285/d34330ce3f604e368c06d-76de1987ce5 (дата обращения 15.08.2025).

Поступила в редакцию 09.09.2025

После доработки 30.09.2025

Принята к публикации 17.10.2025

THERMODENUDATION-BASED REGIONALIZATION OF THE YAMAL PENINSULA

**A.I. Kizyakov¹, I.I. Tarasevich², L.I. Zotova³, V.I. Grebenets⁴,
V.V. Rogov⁵, N.A. Kostenkov⁶, I.D. Streletskaya⁷**

^{1–7} Lomonosov Moscow State University, Department of Cryolithology and Glaciology

¹ Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alexander.kizyakov@geogr.msu.ru

² Postgraduate student; e-mail: ilya.tarasevich@student.msu.ru

³ Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: zotlar@mail.ru

⁴ Associate Professor, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: vgrep@inbox.ru

⁵ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rogovic@mail.ru

⁶ Postgraduate student; e-mail: kostenkov.nikita@mail.ru

⁷ Acting Head of the Department, Associate Professor, Ph.D. in Geology and Mineralogy; irinastrelets@geogr.msu.ru

Climate change in the Arctic intensifies cryogenic relief-forming processes. Thermal denudation in northern Eurasia and North America, where wedge and tabular ground ice are widespread, occurs as a process that combines the melting of ice and frozen ground thawing accompanied by the downslope movement of thawed material. The result of the process is the formation of thermocirques and thermoterraces. Using remote sensing data with interactive interpretation and machine learning techniques, global databases of these landforms' distribution are being developed. The published databases provide new opportunities of further analyzing the spatial manifestations of the phenomena. The authors propose an explanation of the natural conditions and causes that determine the uneven distribution of thermocirques and thermoterraces on the Yamal Peninsula, as well as their future development under the changing conditions. The source data include the DARTS database of thermal denudation landforms in the Arctic, as well as information on the ice content in the upper layers of deposits, the distribution of ice wedges and tabular ground ice, and the relief dissection. To assess how changing permafrost conditions amplify thermal denudation, we used data on the changes of ground temperature at a depth of 2 m and the thickness of the active (seasonally thawed) layer from 1997 to 2021. We found that the

presence of near-surface ground ice is a necessary but insufficient condition for the formation of thermocirques and thermoterraces. A key factor of their emergence and long-term activity is the vertical relief dissection, which enables the removal of thawed material from retreating headwalls to the local base of erosion. The authors have subdivided the Yamal Peninsula into zones based on the current intensity of thermal denudation. Four zones were identified, differing in the spatial density of thermal denudation landforms and in their predicted future development. These differences are determined by the cryogenic structure of the deposits, relief parameters and changes in the permafrost conditions.

Keywords: Arctic, thermocirque, cryogenic processes, permafrost degradation, ground ice, DARTS

Acknowledgements. The research was carried out under the state assignment No. 121051100164-0 "The cryosphere evolution under climate change and anthropogenic impact".

REFERENCES

- Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Y.A. et al. Activation of Cryogenic Processes in Central Yamal as a Result of Regional and Local Change in Climate and Thermal State of Permafrost, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 44, p. 283–290, DOI: 10.3103/S1068373919040083.
- Badu Yu.B., Trofimov V.T., Vasil'chuk Yu.K. [The main patterns of distribution and types of tabular ground ice in the northern part of the West Siberian Plate], *Plastovye l'dy kriolitozony* [Tabular ground ice in the cryolithic zone], Yakutsk, 1982, p. 13–24. (In Russian)
- Barth S., Nitze I., Juhls B. et al. Rapid changes in retrogressive thaw slump dynamics in the Russian High Arctic based on very high-resolution remote sensing, *Geophysical Research Letters*, 2025, vol. 52, iss. 7, e2024GL113022, DOI: 10.1029/2024GL113022.
- Baulin V.V. *Mnogoletnemerzlye porody neftegazonosnykh raionov SSSR* [Permafrost in oil- and gas-bearing regions of the USSR], Moscow, Nedra Publ., 1985, p. 176. (In Russian)
- Bolikhovskaya N.S., Bolikhovskij V.F. [Paleogeographic conditions of continental syncryogenesis in central Yamal Peninsula], *Materialy Pervoi konferentsii geokriologov Rossii* [Proceedings of the First Conference of Russian Geocryologists], vol. 3, Moscow, MGU Publ., 1996, p. 9–15. (In Russian)
- Dubikov G.I. *Sostav i kriogennoe stroenie merzlykh tolshch Zapadnoi Sibiri* [Composition and cryogenic structure of frozen strata of Western Siberia], Moscow, GEOS, 2002, 246 p. (In Russian)
- Karta geneticheskikh tipov i l'distosti verkhnei 10-metrovoi chasti razreza mnogoletnemerzlykh porod Zapadno-Sibirskoi plity. Masshtab 1:1 000 000* [Map of genetic types and ice content of the upper 10-meter part of the permafrost section of the West Siberian Plate. Scale 1:1 000 000], V.T. Trofimov (ed.), Moscow, Tsentrgeologiya Publ., 1982. (In Russian)
- Khomutov A.V., Babkina E.A., Khairullin R.R. et al. Faktory aktivizatsii termodenudatsii i aktivnost' termotsirkov na Tsentr'nom Yamale v 2010–2018 gg. [Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity within central Yamal Peninsula in 2010–2018], *Arctic and Antarctic Research*, 2024, vol. 70, no. 2, p. 222–237, DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237. (In Russian)
- Kislov A.V., Alyautdinov A.R., Baranskaya A.V. et al. Prognoz izmenenii klimata i intensivnosti ekzogennykh protsessov na territorii Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga [Projection of climate change and the intensity of endogenous processes on the territory of the Yamalo-Nenets autonomous district], *Dokl. Ros. akad. nauk, Nauki o Zemle*, 2023, vol. 510, no. 2. p. 233–240, DOI: 10.31857/S2686739723600388. (In Russian)
- Kizyakov A.I. Dinamika termodenudatsionnykh protsessov na poberezh'e Yugorskogo poluostrova [The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast], *Kriosfera Zemli*, 2005, vol. 9, no. 1, p. 63–67. (In Russian)
- Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destruktivnye rel'efoobrazuyushchie protsessy poberezhii arkticheskikh ravnin s plastovymi podzemnymi l'dami [Destructive relief-forming processes at the coasts of the Arctic plains with tabular ground ice], *Kriosfera Zemli*, 2006, vol. 10, no. 2, p. 79–89. (In Russian)
- Klimanova O.A., Kolbovskii E.Yu. Fiziko-geograficheskoe raionirovaniye kak metod delimitatsii granits poluostrosov (na primere poluostrosov Yamal i Gydanskii) [Physical-geographical regionalization as a method of peninsula boundaries delimitation: a case study of the Yamal and Gydan peninsulas], *Problemy regional'noi ekologii*, 2018, no. 4, p. 82–88, DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14082. (In Russian)
- Konishchev V.N. Reaktsiya vechnoi merzloty na poteplenie klimata [Response of permafrost to the climate warming], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2009, no. 4, p. 10–20. (In Russian)
- Konyakhin M.A. Podzemnye l'dy i dinamika kriogeosistem [Ground ice and cryogeosystem dynamics], *Geokologiya Severa*, Moscow, MGU Publ., 1992, p. 43–50. (In Russian)
- Kozin V.V. [Landscape zoning], *Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], S.I. Larin (ed.), Omsk, Omskaya kartograficheskaya fabrika Publ., 2004, p. 221. (In Russian)
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Nesterova N.B. et al. Klassifikatsiya kriogenno-opolznevykh form rel'efa dlya tselei kartografirovaniya i prognoza [Classification of cryogenic-landslide landforms for mapping and prediction], *Arctic and Antarctic Research*, 2023, vol. 69, no. 4, p. 486–500, DOI: 10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500. (In Russian)
- Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y. et al. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, Update since 2001–2010, *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, iss. 20, 4042, DOI: 10.3390/rs13204042
- Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O. et al. The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the North of West Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic, *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. 25, no. 6, p. 34–41, DOI: 10.15372/KZ20210604.

- Nitze I., Heidler K., Nesterova N. et al. DARTS: Multi-year database of AI-detected retrogressive thaw slumps in the circum-arctic permafrost region, *Scientific Data*, 2025, no. 12, 1512, DOI: 10.1038/s41597-025-05810-2.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A. et al. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Science Reviews*, 2019, vol. 193, p. 299–316, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
- Parmuzin S.Yu., Sukhodol'skii S.E. Plastovye l'dy Srednego Yamala i ikh rol' v formirovaniyu rel'efa [Tabular ground ice of the Middle Yamal and its role in the formation of relief], *Plastovye l'dy kriolitozony*, Yakutsk, 1982, p. 51–61. (In Russian)
- Pavlov A.V., Malkova G.V. Dinamika kriolitozony v usloviyakh menyayushchegosya klimata XX–XXI vekov [Dynamics of Permafrost Zone of Russia under changing climate of the 20th–21st centuries], *Izvestiya RAN, Seriya Geogr.*, 2010, no. 5, p. 59–66. (In Russian)
- Solomatin V.I., Konyakhin M.A., Nikolaev V.I. et al. Usloviya zaledaniya i sostav plastovyykh l'dov na poluostrove Yamal [Conditions of occurrence and composition of tabular ground ice on the Yamal Peninsula], *Materialy gletsiologicheskikh issledovanii*, 1993, no. 77, p. 139–147. (In Russian)
- Streletskaia I.D., Leibman M.O. Kriogeokhimicheskaya vzaimosvyaz' plastovyykh l'dov, kriopegov i vmeschayushchikh ikh otlozhenii Tsentral'nogo Yamala [Cryogeochimical interrelation of massive ground ice, cryopegs and enclosing deposits of Central Yamal], *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. 4, no. 3, p. 15–24. (In Russian)
- Tarasevich I.I., Leibman M.O., Kizyakov A.I. et al. Rasprostranenie i dinamika termotsirkov na klyuchevom uchastke Tsentral'nogo Yamala po materialam distantsionnogo zondirovaniya [Spatial distribution and dynamics of thermocirques in a key area of Central Yamal based on remote sensing data], *Arctic and Antarctic Research*, 2024, vol. 70, no. 3, p. 391–411, DOI: 10.30758/0555-2648-2024-70-3-391-411. (In Russian)
- Tumel' N.V. [Permafrost], *Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* [Atlas of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug], S.I. Larin (ed.), Omsk, Omskaya kartograficheskaya fabrika Publ., 2004, p. 156–157. (In Russian)
- Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T., Badu Yu.B. [East Yamal region], *Geokriologiya SSSR, Zapadnaya Sibir'* [Geocryology of the USSR. Western Siberia], E.D. Ershov (ed.), Moscow, Nedra Publ., 1989, p. 172–180. (In Russian)
- Witharana C., Udalwalpola M.R., Liljedahl A.K., et al. Automated Detection of Retrogressive Thaw Slumps in the High Arctic Using High-Resolution Satellite Imagery, *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 17, 4132, DOI: 10.3390/rs14174132.
- Yang Y., Rodenizer H., Rogers B.M. et al. A Collaborative and Scalable Geospatial Data Set for Arctic Retrogressive Thaw Slumps with Data Standards, *Scientific Data*, 2025, vol. 12, 18, DOI: 10.1038/s41597-025-04372-7.
- Zhigarev L.A. *Termodenudatsionnye protsessy i deformacionnoe povedenie protaivayushchikh gruntov* [Thermal denudation processes and deformation of thawing grounds], Moscow, Nauka Publ., 1975, 110 p. (In Russian)

Web sources

- CALM North Summary Data Table. Circumpolar Active Layer Monitoring Network, URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (access date 14.08.2025).
- Porter C., Morin P., Howat I. et al. ArcticDEM, Version 4.1, Harvard Dataverse, V1, 2018, URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/3VDC4W> (access date 02.09.2025).
- Westermann S., Barboux C., Bartsch A. et al. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost Ground Temperature for the Northern Hemisphere, v4.0. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 04 April 2024, 2024a, URL: <https://dx.doi.org/10.5285/20e c12f5d1f94e99aff2ed796264ee65> (access date 15.08.2025).
- Westermann S., Barboux C., Bartsch A. et al. ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost active layer thickness for the Northern Hemisphere, v4.0. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, 24 April 2024, 2024b, URL: <https://dx.doi.org/10.5285/d34330ce3f604e368c06d76de1987ce5> (access date 15.08.2025).

Received 09.09.2025

Revised 30.09.2025

Accepted 17.10.2025