

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-391-411>

УДК 551.435.5+528.88



Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования

И.И. Тарасевич^{1,2✉}, М.О. Лейбман¹, А.И. Кизяков²,
Н.Б. Нестерова^{3,4}, А.В. Хомутов¹

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера,
отделение в Потсдаме, Германия

⁴ Университет Потсдама, Германия

✉ ilya.tarasevich@student.msu.ru

ИИТ, 0000-0002-7581-731X; МОЛ, 0000-0003-4634-6413; АИК, 0000-0003-4912-1850;
НБН, 0000-0001-7055-9852; АВХ, 0000-0001-8855-3483

Аннотация. В последние десятилетия активно исследуется процесс термоденудации, приводящий к формированию специфических форм рельефа — термоцирков. В разных регионах криолитозоны и на разных временных отрезках наблюдается как активизация, так и затухание термоцирков, при этом, как правило, рассматриваются климатические причины наблюдаемого. В настоящей статье предлагается анализ динамики термоцирков и особенностей рельефа на ключевом участке Центрального Ямала. Для этого на основе разновременных материалов дистанционного зондирования Земли рассмотрена пространственная приуроченность термоцирков к разным геоморфологическим уровням. Прослежена их динамика за 14 лет, с 2009 по 2023 г. Установлено, что суммарная площадь термоцирков на участке увеличилась на 296 %. Они развиты исключительно на склонах крутизной 5–12°. 90 % исследованных форм приурочено к склонам III аллювиально-морской равнины, а их суммарная площадь больше на склонах западной экспозиции, которые преобладают на этом уровне в пределах участка. Наибольшие средние значения площади и протяженности термоцирков, определенной как кратчайшее расстояние между бровкой и подошвой, отмечаются на склонах южной экспозиции.

Ключевые слова: криогенные процессы, многолетнемерзлые породы, термоденудация, термоцирк, полуостров Ямал

Для цитирования: Тарасевич И.И., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Хомутов А.В. Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(3):391–411. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-391-411>

Поступила 22.07.2024

После переработки 13.09.2024

Принята 17.09.2024

Spatial distribution and dynamics of thermocirques in a key area of Central Yamal based on remote sensing data

Iliya I. Tarasevich^{1,2✉}, Marina O. Leibman¹, Alexander I. Kizyakov²,
Nina B. Nesterova^{3,4}, Artem V. Khomutov¹

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

⁴ University of Potsdam, Germany

✉ ilya.tarasevich@student.msu.ru

ИД ИТ, 0000-0002-7581-731X; MOL, 0000-0003-4634-6413; AIK, 0000-0003-4912-1850; NBN, 0000-0001-7055-9852; AVK, 0000-0001-8855-3483

Abstract. In recent decades, the distribution and activation of thermodenudation, which leads to the formation of specific landforms — thermocirques (also referred to as retrogressive thaw slumps, RTS), have been intensively studied. In different regions of the cryolithozone and at different time intervals, both activation and stabilization of thermocirques are observed. As a rule, studies focus on the climatic controls of the phenomena observed, the environmental controls are discussed less often. This study presents an analysis of the dynamics of thermocirques in relation to the relief features in a specific key area of Central Yamal. To achieve this aim, the spatial distribution of thermocirques at different geomorphological levels is considered based on multi-temporal remote sensing data. Satellite images obtained in 2009, 2018, and 2023, as well as a global digital elevation model (ArcticDEM), were used. We outlined five geomorphic levels and determined their parameters: area, altitude, steepness, and the aspect of the slopes. Thermocirques were identified in the images and their parameters were measured. The dynamics of the thermocirques were analyzed by their number, area, length, width, slope aspect and angle for the periods 2009–2018 and 2018–2023, and for 14 years in total, separately for each geomorphic level. It was found that thermocirques predominate on the slopes of the III alluvial-marine plain, 5–12° steep. In 14 years, the total area of thermocirques increased by 296 %, and their number — by 61 %. A larger increase in the total area and number of thermocirques occurred during the period 2009–2018 in response to climate extremes in 2012 and 2016. Thermocirques that face west cover a higher total area, partly due to the predominance of such slopes over the area of the key site. In all the years of observation, the average areas and lengths of thermocirques are maximum on south-facing slopes. Some of the results are close to those obtained in other regions of Russia and in North America. In many of the areas studied, the increase in the total area of thermocirques exceeded the increase in their number, which means that the expansion of the existing forms prevails over the inception of the new ones. The discrepancies observed in different studies in the results of assessing the effect of relief on thermocirques are due to both the regional features and differences in satellite imagery and methods of its processing.

Keywords: periglacial processes, permafrost, thermocirque, thermodenudation, Yamal Peninsula

For citation: Tarasevich I.I., Leibman M.O., Kizyakov A.I., Nesterova N.B., Khomutov A.V. Spatial distribution and dynamics of thermocirques in a key area of Central Yamal based on remote sensing data. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(3):391–411. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-391-411>

Received 22.07.2024

Revised 13.09.2024

Accepted 17.09.2024

Введение

Термоцирки (ТЦ) — характерные формы рельефа областей распространения залежеобразующих подземных льдов [1]. Первоначально образующиеся как единичные оползни течения, ТЦ впоследствии развиваются в крупные отрицательные

формы с четко выраженными стенками, в которых вскрывается подземный лед [2]. ТЦ возникают в местах неглубокого залегания крупных тел подземных льдов или сильнольдистых пород. В своем развитии ТЦ проявляют цикличность с постепенной сменой стадий активизации/стабилизации [2].

Многочисленные исследования демонстрируют возрастающую активность ТЦ в различных регионах криолитозоны [3–5], являющуюся следствием реакции многолетнемерзлых пород на повышение температуры пород и увеличение глубины сезонного протаивания [6]. С точки зрения фундаментальной науки ТЦ интересны как крайне динамичная форма рельефа, являющаяся индикатором крупных залежей подземного льда. К наиболее актуальным направлениям в изучении ТЦ стоит причислить полевые исследования [2, 7] и применение цифровых технологий для изучения распространения, динамики и масштабов проявления термоденудации. К последним, в первую очередь, относятся ручное дешифрирование космических снимков субметрового пространственного разрешения [8, 9] и построение изображений методом *structure-from-motion* на основе материалов съемки с беспилотных летательных аппаратов [10]. Стоит отметить значительную роль высокодетальных цифровых моделей рельефа при анализе поверхности [11–13] и применение данных лидарной [5] и радарной [12, 14] съемки.

В последние годы увеличивается число исследований, посвященных картографированию ТЦ с помощью технологий искусственного интеллекта. При этом отмечается большое количество неточно и ошибочно выделенных объектов при использовании разработанных моделей [11, 13, 15], а точность таких методик до сих пор не была оценена из-за недостатка полевых данных. Мы придерживаемся позиции, что применение данных дистанционного зондирования открывает большие перспективы для изучения ТЦ, однако полевые исследования по-прежнему являются необходимой основой для корректной интерпретации проявлений криогенных процессов на материалах космической или аэросъемки.

Помимо вопросов фундаментальной науки, изучение ТЦ представляется необходимостью в сфере решения прикладных задач по освоению Арктики — как явления, способного представлять значительную опасность инженерным сооружениям.

При оценке динамики ТЦ современные исследования уделяют значительное внимание климатическим параметрам, однако гораздо реже оценивают местный рельеф. При этом если влияние рельефа на ход термоденудации и рассматривается, то достаточно ограниченно, т. к. разные методики дают несопоставимые результаты.

Настоящее исследование посвящено изучению ТЦ на ключевом участке в южной части стационара «Васькины Дачи». Цель исследования — установить влияние мезорельефа на распространение и морфометрические характеристики ТЦ, проследить динамику ТЦ за период 2009–2023 гг. и разработать методику для получения сопоставимых данных в разных регионах.

Район работ

Ключевой участок площадью 13,6 км² расположен на Центральном Ямале в южной части научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи». Северо-западная оконечность участка расположена на 70°14'33" с. ш., 68°57'11" в. д., северо-восточная — на 70°12'54" с. ш., 69°4'15" в. д. С севера на юг район работ пересекает ж/д линия «Обская–Бованенково».

Выделение ключевого участка обусловлено наличием разновременных космических снимков в требуемом разрешении (табл. 1). К основным особенностям участка стоит отнести высокую интенсивность термоденудации и большое число

крупных ТЦ, неоднократно обследованных в ходе ежегодных полевых исследований [4]. На участке также встречаются все характерные для Центрального Ямала геоморфологические уровни [16].

Для Центрального Ямала характерна выраженная ступенчатость рельефа с пятью основными геоморфологическими уровнями — V (Салехардская), IV (Казанцевская) и III аллювиально-морская равнины, II и I надпойменные террасы [17]. Научно-исследовательский стационар «Васькины Дачи» приурочен к междуречью рек Се-яха и Морды-яха. Чехол четвертичных отложений на ключевом участке представлен морскими, склоновыми, озерными и аллювиальными отложениями. Характерен холмисто-увалистый рельеф, расчлененный овражно-эрозионной сетью и днищами озер и хасыреев [16].

Для разреза характерны мощные пластовые залежи льда. Кровля пластовых тел располагается на глубине от первых метров до 25–30 м [18]. Меньшую роль в разрезе играют полигонально-жильные льды.

Межгодовые значения средней глубины сезонного протаивания на площадках колеблются от 70–90 до 110–150 см, но могут превышать 2 м, достигая глубины залегания пластовых льдов [6].

Методика

Для оценки морфометрических характеристик рельефа и динамики развития ТЦ на ключевом участке использовалась серия космических снимков 2009, 2018 и 2023 гг. и глобальная цифровая модель рельефа 2013 г. (см. табл. 1).

Таблица 1

Исходные материалы дистанционного зондирования Земли

Table 1

Initial remote sensing data

Исходные материалы дистанционного зондирования Земли	Спутник	Дата съемки	Пространственное разрешение
Синтезированный космический снимок с комбинацией каналов Red-Green-Blue Мозаика спутниковых снимков Esri World Imagery Basemap [19]	GeoEye-1	15.08.2009	0,41 м
	WorldView-2	10.07.2018	0,46 м
	WorldView-2	13.08.2023	0,5 м [19]
Цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM Strip [20]	Построена по стереопаре WorldView-2	10.06.2013	2 м

Обработка и интерпретация материалов дистанционного зондирования, а также морфометрический анализ рельефа выполнены в программе Esri ArcMap 10.8.2.

Первичная обработка материалов дистанционного зондирования

Для снимков 2009 и 2018 гг. проведена ортокоррекция, представляющая собой преобразование исходного изображения в соответствии с учетом неровностей земной поверхности. В качестве ЦМР из покрытия ArcticDEM выбран наиболее ранний по дате съемки strip-файл от 10.06.2013 [20], имеющий минимальный из представленных в онлайн-каталоге угол съемки и полученный при наиболее благоприятных погодных условиях. Ортокоррекция снимка 2023 г. не проводилась, поскольку подложка спутниковых снимков Esri World Imagery Basemap распространяется в виде обработанной онлайн-мозаики. При этом компания Esri не предоставляет информацию о ЦМР, используемых ими при трансформировании снимков. Дальнейшие погреш-

ности между синтезированными снимками и онлайн-мозаикой минимизированы посредством автоматизированного блочного уравнивания.

Для сопоставления характеристик рельефа, описанных в ранних публикациях на основе топографических карт, значения ЦМР приведены к Балтийской системе высот. Ввиду использования различных высотных отметок (нормальные и ортометрические) погрешности между двумя наборами данных на отдельных участках севера Западной Сибири могут достигать 15 м [21]. Для получения коэффициента пересчета вручную сопоставлены высотные отметки вершин и низин, зафиксированные на топографической карте 1:25000 и на ЦМР ArcticDEM.

Характеристика рельефа участка

Границы геоморфологических уровней (по [17]) проведены на основе сопоставления отметок вершинных поверхностей, уклонов и характера растительности. На основании длительных полевых исследований, включавших описание разрезов в скважинах и обнажениях [16], мы приняли, что в пределах ключевого участка поверхности относятся к II надпойменной террасе, если выраженные плоские субгоризонтальные поверхности приурочены к абсолютным высотам до 25 м, к III аллювиально-морской равнине — до 36 м, к IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнине — до 45 м, к V морской (Салехардской) равнине — выше 45 м. Для определения площади ключевого участка, занятой озерами, оцифрована их береговая линия по состоянию на 2018 г., для которого было идентифицировано наибольшее число ТЦ.

На основе ЦМР определены площади и пространственная приуроченность склонов различных экспозиций по 8 румбам. Предварительно из ЦМР исключены пиксели, соответствующие низменностям (плоские днища с углами наклона менее 1°) и ж/д насыпи, значительно преобразовавшей рельеф. В автоматизированном режиме, на основе максимальных различий в распределении диапазонов (метод естественных границ Дженкса), выделено 9 классов угла макросклона с граничными значениями 1, 3, 5, 7, 9, 12, 23 и 48°. Подсчитаны площади склонов различной крутизны.

Оконтуривание ТЦ

ТЦ идентифицированы интерактивным дешифрированием снимков (см. табл. 1) по визуальным признакам на 3 временных среза: 2009 г. — до начала строительства ж/д и заметной активизации термоденудации; 2018 г. — после экстремально теплых летних сезонов 2012 и 2016 гг. [6]; и 2023 г. — наиболее поздний из доступных материалов дистанционного зондирования, после экстремально теплого лета 2020 г. [22].

При первичном дешифрировании ТЦ распознавались по характеру поверхности, резко контрастирующему между днищем ТЦ и окружающей тундрой. Контуры ТЦ в зоне денудации выделялись по линии бровки, как правило, подчеркнутой тенью или видимым обнажением. Нижняя часть ТЦ (зона аккумуляции) оконтуривалась по границам конуса выноса и/или по линии уреза водной поверхности.

Определение морфометрических параметров ТЦ

Поскольку не было возможности определить углы склонов до появления на них ТЦ (отсутствовали ЦМР достаточного разрешения на период ранее 2009 г.), было решено определять уклон поверхности внутри контура уже образовавшегося ТЦ на основе более поздних ЦМР. Уклон поверхности в пределах контура ТЦ определялся как среднее значение крутизны пикселей ЦМР. Это значение приравнялось к крутизне склона, предшествовавшего возникновению ТЦ. Несмотря на вероятные ошибки при определении абсолютного значения крутизны, применение стандартной

независимой процедуры позволяет оперировать различиями этого параметра при сопоставлении разных объектов.

Исходя из тех же соображений поиска независимой от оператора процедуры, экспозиция ТЦ определена как наиболее часто встречающийся класс экспозиции каждого пиксела в пределах контура ТЦ.

Авторами были опробованы несколько способов вычисления длины и ширины ТЦ. Наиболее универсальным способом измерения длины авторам представляется вычисление протяженности тальвега, однако для этого необходимо наличие ЦМР на

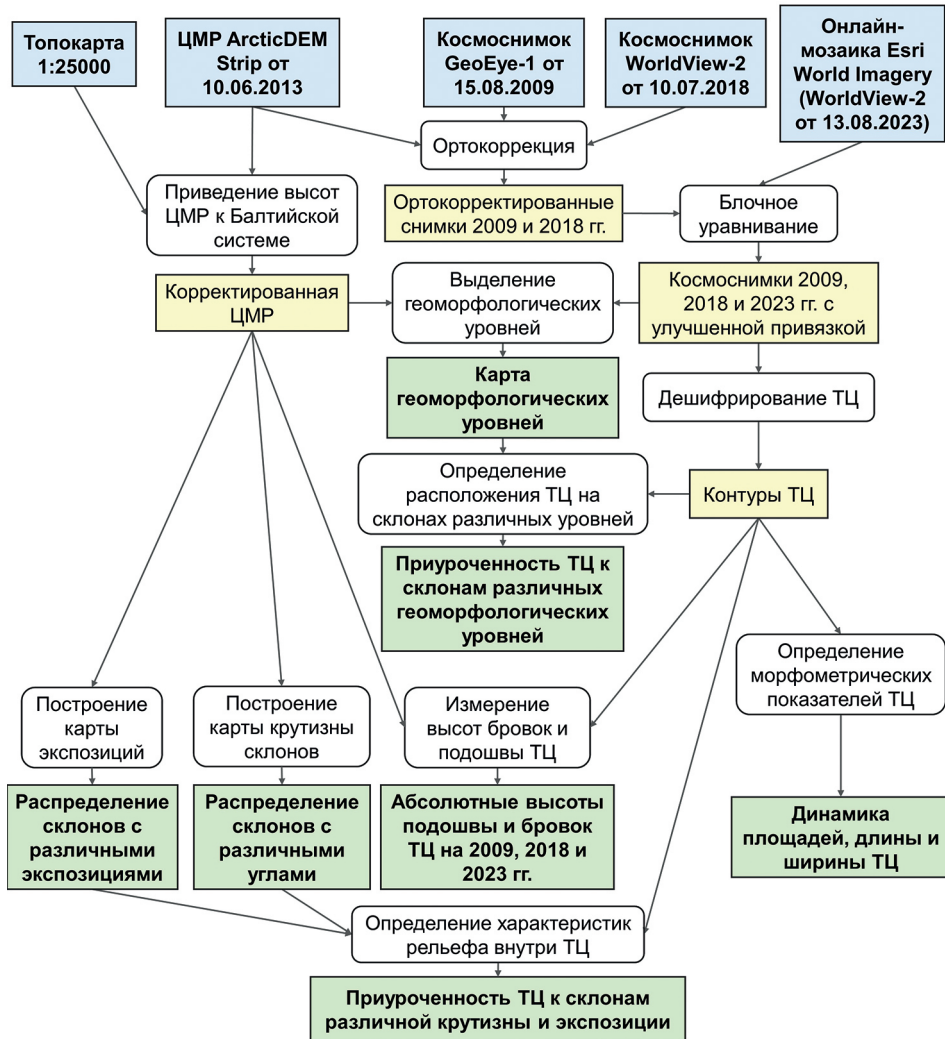


Рис. 1. Алгоритм выполнения исследования: исходные материалы — синяя заливка, этапы работы (бесцветные), промежуточные результаты — желтая заливка и полученные окончательные результаты — зеленая заливка

Fig. 1. The algorithm of the study: initial materials (filled with blue), work stages (colorless), intermediate results (filled with yellow), and final results (filled with green)

все три года наблюдений. Для крупных ТЦ подковообразной формы также применим способ, при котором за длину принимается протяженность перпендикуляра, проведенного к линии, соединяющей места контакта краев ТЦ с урезом воды. Учитывая многообразие форм, выделенных на участке, авторами был принят компромиссный вариант — расчет длины и ширины ТЦ выполнен посредством сглаживания изрезанных контуров. После этого измерены самый длинный и самый короткий отрезки, соединяющие противоположащие точки. В ручном режиме, с использованием ЦМР, эти отрезки были назначены длиной, если они направлены вниз по склону, и шириной — если они направлены параллельно склону.

Необходимо отметить, что выбранный способ плохо подходит для ТЦ с каплевидной (вытянутой) формой, но таких ТЦ на участке только 2.

Площади ТЦ на каждом из трех снимков посчитаны в проекции на плоскость в UTM WGS 84.

Методика работы (исходные данные, этапы работы и полученные результаты) представлена в виде блок-схемы на рис. 1.

Результаты

Параметры рельефа ключевого участка

На участках пересечения листов топографической карты 1:25000 и strip-файла ЦМР ArcticDEM от 10.06.2013 вручную сопоставлены 122 точки, соответствующие отметкам высот на террасовидных поверхностях, плоских междуречьях, урезах воды на озерах и водотоках. Оба набора данных демонстрируют сильную линейную корреляцию ($R^2 = 0,99$) со средним значением разницы высот между Балтийской системой и WGS 84 в 6,3 м. Высоты исходной ЦМР ArcticDEM преобразованы в соответствии с уравнением: $y = 1,0363x + 5,7418$.

По итогам интерпретации материалов дистанционного зондирования на ключевом участке выделено 5 геоморфологических уровней (рис. 2а), занимающих разные площади (рис. 2б). Наибольшие площади приходятся на поверхность III аллювиально-морской равнины, вершина и склоны которой занимают 34,9 % территории исследуемого участка. Диапазон высот от подошвы склонов до вершин — от 7 до 35 м. Значительные площади заняты IV прибрежно-морской (Казанцевской) равниной с диапазоном высот от 10 до 45 м. Суммарно на этот уровень приходится 24,3 % площади. Склоны V морской (Салехардской) равнины распространены локально в юго-восточной части и занимают 3,2 % ключевого участка с перепадом высот от 32 до 52 м. В долине р. Нгэрм-Лымбадьяха небольшими участками (3,1 %) представлена поверхность II надпойменной террасы с высотами от 10 до 25 м. 22,8 % участка занимают плоские днища с самыми низкими на участке отметками поверхности от 5 м. На озера приходится 11,7 % площади участка.

Суммарная площадь анализируемых поверхностей составляет 9,16 км² (67,3 % от всей площади ключевого участка за вычетом площади днищ долин, озерных котловин, хасыреев, а также ж/д насыпи). Более половины от общей площади анализируемых поверхностей (67,2 %) приходится на участки со средней крутизной от 1 до 5°, среди которых преобладают склоны крутизной 1–3° (рис. 2в). Значительные площади приходятся на склоны крутизной 5–7° (15 %). Склоны круче 7° представлены крайне ограниченно (10 %) и в основном приурочены к уступам древних термоденудационных форм, оползневых цирков и к бортам оврагов.

На ключевом участке преобладают склоны северо-западной экспозиции (см. рис. 2в). Доля склонов восточной и юго-восточной экспозиций заметно ниже.

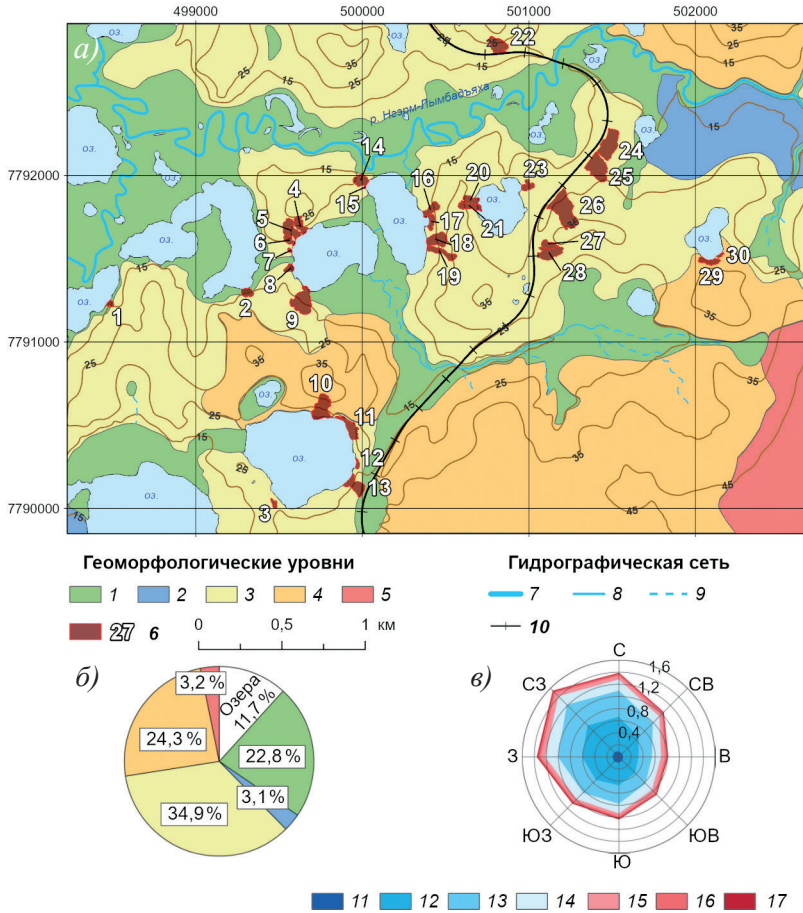


Рис. 2. Карта распространения геоморфологических уровней, границы ТЦ отмечены в соответствии со снимком WorldView-2 от 10.07.2018 (а); круговая диаграмма процентного соотношения площадей разных геоморфологических уровней (б); распределение площадей склонов (км²) различной крутизны (°) по 8 румбам экспозиции на ключевом участке (лепестковая диаграмма с накоплением) (в).

1 — днища (хасыреи, долины водотоков); 2 — II надпойменная терраса; 3 — III аллювиально-морская равнина; 4 — IV прибрежно-морская (Казанцевская) равнина; 5 — V морская (Салехардская) равнина; 6 — ТЦ по пластовым льдам и их номера; 7 — малые реки; 8 — мелкие водотоки; 9 — временные водотоки; 10 — ж/д линия «Обская — Бованенково»; склоны крутизной: 11 — 0–1°, 12 — 1–3°, 13 — 3–5°, 14 — 5–7°, 15 — 7–9°, 16 — 9–12°, 17 — 12° и более

Fig. 2. Distribution map of geomorphological levels, with thermocirque boundaries mapped according to the WorldView-2 satellite imagery from 10.07.2018 (a); pie chart showing the percentage distribution of areas with different geomorphological levels (b); distribution of slope areas (km²) of different steepness (°) across 8 directions in the key area (stacked radar chart) (c).

1 — low-lying lands (dried lakes, valleys of watercourses); 2 — II fluvial terrace; 3 — III alluvial-marine plain; 4 — IV coastal-marine (Kazantsevskaya) plain; 5 — V marine (Salekhardskaya) plain; 6 — massive ice thermocirques and their numbers; 7 — small rivers; 8 — small watercourses; 9 — temporary watercourses; 10 — «Obskaya — Bovanenkovо» railway line; slopes with a steepness of: 11 — 0–1°, 12 — 1–3°, 13 — 3–5°, 14 — 5–7°, 15 — 7–9°, 16 — 9–12°, 17 — 12° and above

Таблица 2

Table 2

Сводная таблица параметров ТЦ на ключевом участке на разные временные срезы

Summary table of thermocirque parameters at the key site for different time slices

№	Морфометрия						Высота			Средняя крутизна, °			Экспозиция				
	Площадь, м ²		Ширина, м		Длина, м		Ширина/длина			Подтошвы			Бровки				
	2009	2018	2023	2009	2018	2023	2009	2018	2023	2009	2018	2023	2009	2018	2023		
1	1141	1190	1190	38	45	47	47	0,8	0,8	8,6	15,6	15,6	10	10	10	С3	С3
2	3047	3179	6635	77	55	55	116	1,4	0,9	7,8	17,8	19,8	10	10	7	С	С3
3	4760	4760	4760	62	62	115	115	0,5	0,5	19,0	23,8	23,8	6	6	6	СВ	СВ
4	7653	7653	7653	89	139	139	139	0,6	0,6	7,2	25,5	25,5	11	11	11	Ю	Ю
5	446	2588	2588	19	48	84	84	0,6	0,6	7,4	23,1	23,1	6	6	6	ЮВ	ЮВ
6	583	583	583	26	26	36	36	0,7	0,7	8,2	16,3	16,3	9	6	6	ЮВ	ЮВ
7	1090	2046	2046	47	35	68	68	1,3	0,7	7,9	11,2	11,2	5	5	5	В	В
8	14041	14454	14454	131	133	171	175	0,8	0,8	6,1	22,3	22,4	7	7	7	В	В
9	12223	13342	13342	120	123	167	182	0,7	0,7	17,7	38,1	38,3	8	8	8	СВ	СВ
10	5824	6903	7396	182	194	200	200	2,4	2,4	18,6	27,2	27,5	10	10	10	Ю	Ю
11	859	945	945	65	65	24	25	2,7	2,6	20,0	23,3	23,3	10	9	9	3	3
12	1348	7594	7594	35	97	64	146	0,5	0,7	18,1	27,8	30,2	10	6	6	3	С3
13*	4717	4716	4716	71	71	96	96	0,7	0,7	7,1	16,2	16,2	6	6	6	В	В
14	166	190	190	20	22	13	14	1,5	1,6	7,9	9,5	9,5	8	8	8	В	В
15	4127	4482	4482	57	59	109	119	0,5	0,5	6,6	20,8	20,8	7	7	7	3	3
16	1792	2832	26667	65	103	41	47	1,6	2,2	7,3	10,7	14,4	6	8	7	3	3
17	2817	8188	12274	38	92	117	135	0,3	0,7	6,7	27,3	29,0	10	10	10	3	3
18	3476	5795	5795	37	53	125	189	0,3	0,3	6,7	19,7	31,4	7	7	7	3	3
19	3901	4052	4052	58	49	102	117	0,6	0,4	14,6	25,3	28,0	7	7	7	3	3
20	4540	6918	6918	43	74	148	170	0,3	0,4	14,7	29,1	29,9	6	6	6	В	В
21	8005	8005	8005	93	93	134	134	0,7	0,7	19,8	31,8	31,8	6	6	6	Ю	Ю
22*	2624	3122	3122	65	65	77	82	0,8	0,8	15,2	21,7	22,5	6	6	6	Ю3	Ю3
23	14282	14282	14282	196	196	99	99	2,0	2,0	18,7	26,2	26,2	5	5	5	3	3
24*	14437	14437	14437	122	122	188	188	0,6	0,6	17,9	26,0	26,0	5	5	5	С3	С3
25*	21773	21773	21773	151	151	249	249	0,6	0,6	22,9	37,5	37,5	4	4	4	С3	С3
26*	3656	3656	3656	52	52	106	106	0,5	0,5	28,6	35,2	35,2	4	4	4	Ю3	Ю3
27*	8348	8348	8348	82	82	166	166	0,5	0,5	27,8	35,0	35,0	4	4	4	С3	С3
28*	3111	3721	4026	119	134	140	140	2,9	3,0	27,2	33,3	33,3	8	8	8	С	С
29	620	736	736	48	48	20	20	2,4	1,9	26,7	29,5	30,3	7	7	7	С3	С3

Примечание. * — техногенные ТЦ

Note. * — technogenic thermocirques

Составлена сводная таблица динамики значений площади, длины, ширины, крутизны и преобладающей экспозиции каждого ТЦ (табл. 2).

Изменение экспозиции во времени связано с тем, что расширяющийся ТЦ захватывает склон другой экспозиции. Изменение крутизны — с тем, что соответствующий ТЦ развивается в направлении плоской вершины. Число активных ТЦ значительно отличается в разные периоды, с чем связано наличие пустых ячеек в табл. 2. Максимальное количество ТЦ (30) выделено на снимке 2018 г., минимальное — на снимке 2009 г. (17). К августу 2023 г. число ТЦ снизилось до 29, так как один ТЦ (№ 16) слился с увеличившимся соседним (№ 17).

По данным табл. 2 рассчитано распределение различных показателей ТЦ по экспозициям и крутизне за разные годы (рис. 3–5). Эти показатели получены как для всех ТЦ, так и для ТЦ, отмеченных на снимке 2009 г. и оставшихся активными в последующие годы. Под суммарной площадью ТЦ мы подразумеваем общую площадь ТЦ определенной категории на ключевом участке, под средней площадью ТЦ — среднее значение диапазона площадей ТЦ определенной категории. Индивидуальная площадь ТЦ — это площадь отдельного ТЦ.

При оценке приуроченности ТЦ к склонам различной крутизны и экспозиции исследуемые объекты были разделены на естественные и техногенные по происхождению. На снимке 2009 г. обнаружен единственный техногенный ТЦ, возникший вследствие регулярного проезда автотранспорта. Еще 6 техногенных ТЦ идентифицированы на снимке 2018 г. Их зарождение можно непосредственно связать со строительством и обслуживанием ж/д линии, поскольку либо подошва, либо бровка

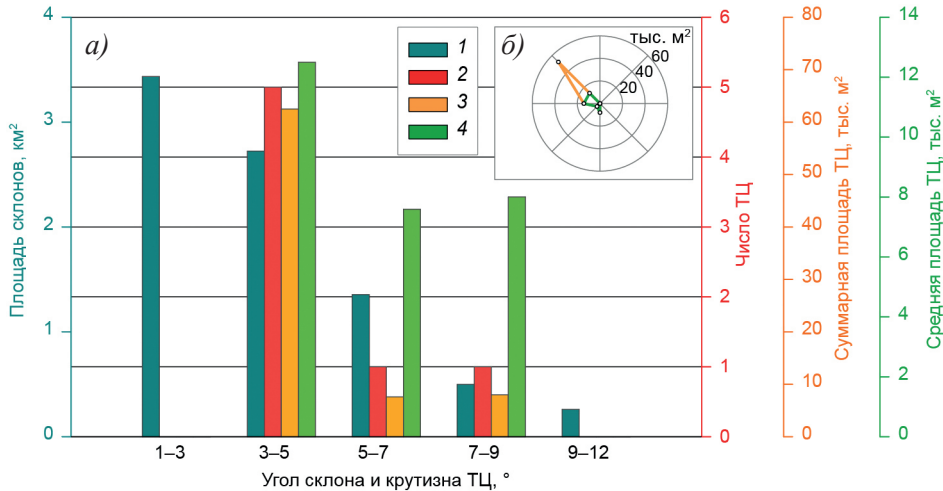


Рис. 3. Распределение показателей техногенных ТЦ по склонам с различными углами (а) и экспозициями (б).

1 — площадь склонов на ключевом участке; 2 — число ТЦ; 3 — суммарная площадь ТЦ; 4 — средняя площадь ТЦ

Fig. 3. Distribution of parameters of technogenic thermocirque on slopes vs slope angle (a) and vs slope aspect (b).

1 — area of slopes within the key site; 2 — number of thermocirques; 3 — total area of thermocirques; 4 — average area of a thermocirque

каждого из них приурочена к контуру насыпи. На снимке 2023 г. новых техногенных ТЦ не обнаружено, а старые не проявляли динамику.

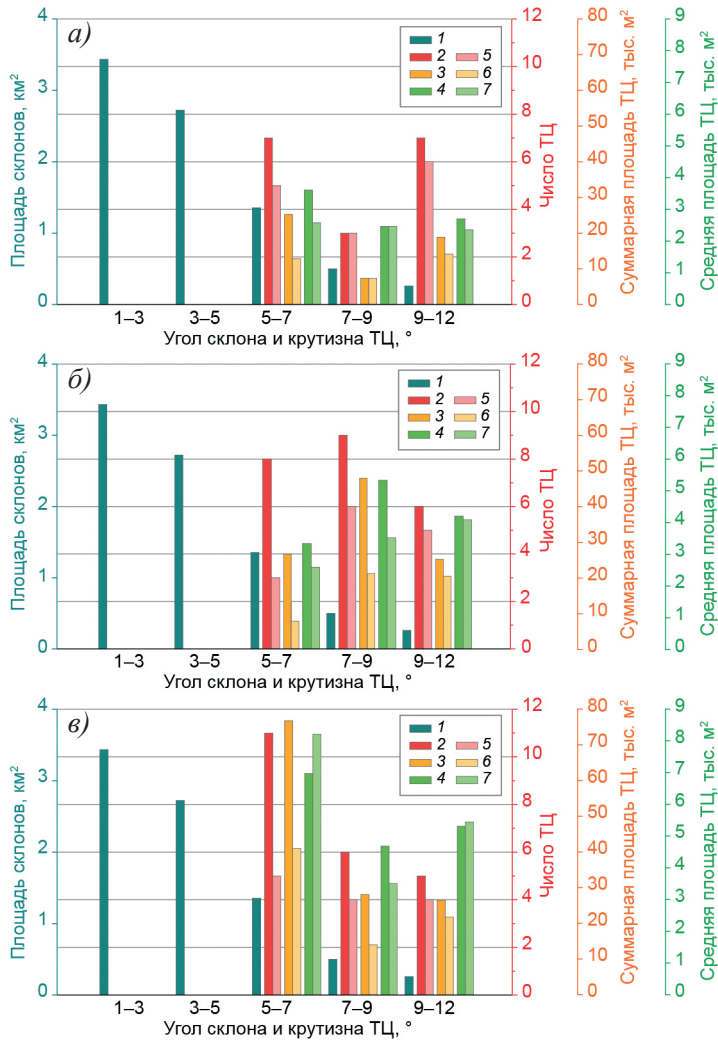


Рис. 4. Распределение естественных ТЦ на склонах различной крутизны в 2009 (а), 2018 (б) и 2023 гг. (в).

1 — площадь склонов на ключевом участке; для всех ТЦ; 2 — число; 3 — суммарная площадь; 4 — средняя площадь; для части ТЦ 2009 г., сохраняющей активность в последующие годы; 5 — число; 6 — суммарная площадь; 7 — средняя площадь

Fig. 4. Distribution of natural thermocirques on slopes of different steepness in (a) 2009, (б) 2018 and (в) 2023.

1 — area of slopes within the key site; for all thermocirques; 2 — number; 3 — total area; 4 — average area; for the part of the 2009 thermocirques that remains active in the subsequent years; 5 — number; 6 — total area; 7 — average area

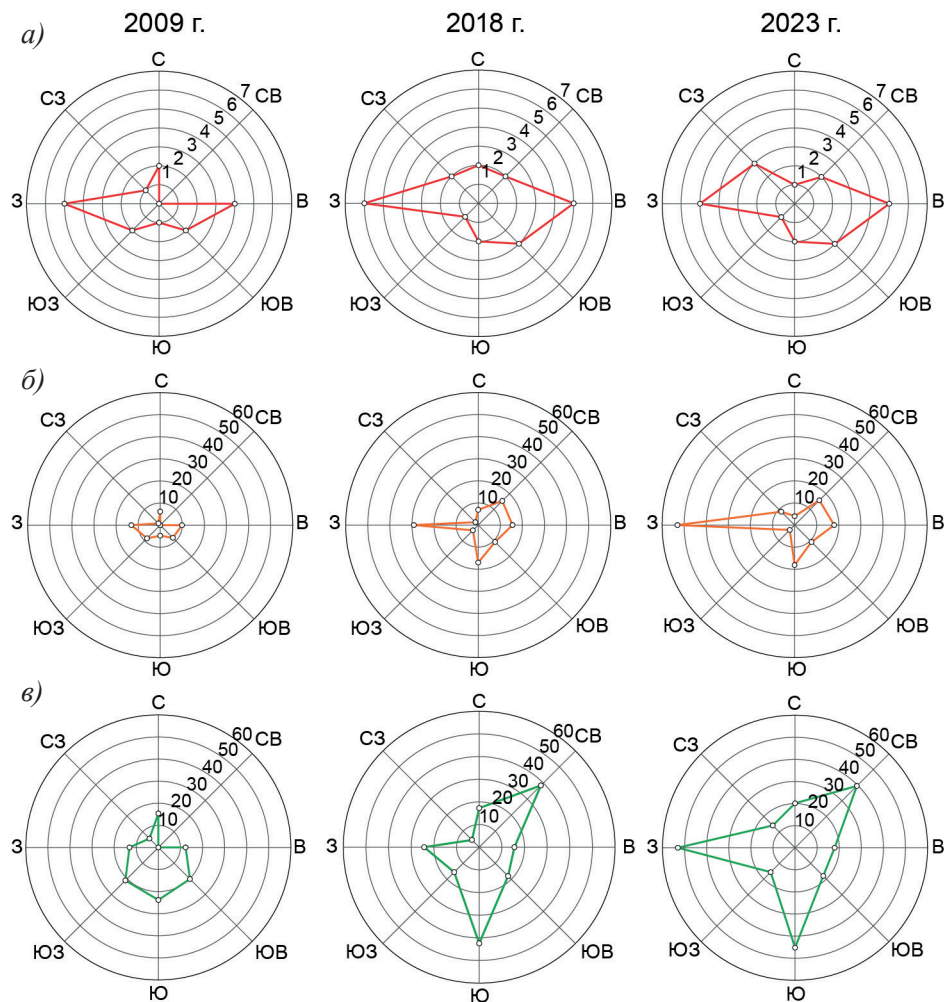


Рис. 5. Распределение числа (а), суммарной площади (б) и средней площади естественных ТЦ (в) по склонам разных экспозиций в 2009, 2018 и 2023 гг.

Fig. 5. Distribution of number (a), total area (б), and average area of natural thermocirques (в) by slope aspects in 2009, 2018, and 2023

Пять из семи техногенных ТЦ расположены на склонах крутизной 3–5° (рис. 3а). Диапазон индивидуальных площадей таких ТЦ очень широк (от 3,7 до 21,8 тыс. м², см. табл. 2), поэтому выборка статистически нерепрезентативна и более детальный анализ не проводился. Подавляющее большинство техногенных ТЦ имеют северо-западную экспозицию (рис. 3б).

ТЦ, возникшие в естественных условиях, расположены в среднем на более крутых склонах, в диапазоне 5–12° (см. рис. 4).

По состоянию на 2009 г. (рис. 4а) средняя площадь ТЦ на более крутых (7–12°) склонах примерно на четверть ниже по сравнению с ТЦ на относительно пологих (5–7°) склонах. К 2018 г. зарождение новых крупных ТЦ на склонах с преобладающей

крутизной 7–9° (рис. 4б) изменило распределение параметров. На этот временной срез ТЦ на склонах 7–9° имеют наибольшую суммарную и среднюю площади, во многом благодаря появлению новых ТЦ № 9 и № 10 с индивидуальными площадями более 10 тыс. м² (см. табл. 2). К 2023 г. наибольшие значения параметров для всех ТЦ фиксируются на склонах 5–7° (рис. 4в). Это связано с тем, что за период после 2018 г. новые ТЦ не появлялись, а существовавшие ранее разрастались, захватывая более пологие верхние части склонов.

ТЦ 2009 г., оставшиеся активными в последующие годы наблюдений, примечательны тем, что при незначительном сокращении числа (с 14 в 2009 г. до 13 в 2023 г.) из года в год стабильно увеличивали суммарную площадь на участке, превышая вклад в увеличение суммарной площади всех прочих ТЦ. ТЦ 2009 г., сохранявшие активность в последующие годы и имевшие крутизну 5–7°, отличаются максимальной за весь период наблюдений средней площадью — 8,2 тыс. м² (см. рис. 4в).

Наибольшее число естественных ТЦ на каждый временной срез отмечалось на склонах западной и восточной экспозиций (рис. 5а). В 2009 г. наибольшие суммарные площади имели ТЦ с западной и восточной экспозициями (рис. 5б), но к 2023 г. ТЦ с западной экспозицией стали заметно преобладать. На все три временных среза ТЦ с южной экспозицией имели наибольшие средние площади (рис. 5в).

Обсуждение

Динамика ТЦ

Суммарная площадь ТЦ на ключевом участке за 14 лет выросла на 296,2 % (табл. 3). При этом средняя площадь ТЦ увеличилась на 145,9 %, а общее число ТЦ — на 61,1 %. Это говорит о том, что за период 2009–2023 гг. основной вклад в развитие термоденудации внес интенсивный рост уже существующих ТЦ, а не возникновение новых форм.

Таблица 3

Динамика морфометрических показателей ТЦ

Table 3

Dynamics of morphometric parameters of thermocirques

Показатель		2009	2018	2023	
Суммарная площадь ТЦ	В абсолютном выражении, м ²	Всего	52898	177848	209565
		На III аллювиально-морской равнине	49787	161283	191461
		На IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнине	3111	16565	18104
	В относительном выражении (пораженность), %	К площади ключевого участка	0,39	1,31	1,54
		К площади склонов	0,58	1,94	2,29
		К площади III аллювиально-морской равнины	1,11	3,74	4,41
		К площади IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнины	0,09	0,50	0,55
Средняя площадь ТЦ, м ²		2939	5928	7226	
Средняя длина ТЦ, м		72,8	105,1	115,1	
Средняя ширина ТЦ, м		63,3	82,1	89,7	

Заметна тенденция увеличения доли очень крупных ТЦ (более 10 тыс. м²) среди общего числа активных форм. Так, в 2009 г. максимальная индивидуальная площадь ТЦ на участке составляла всего 7,6 тыс. м² (см. табл. 2; ТЦ № 5). В 2018 г. на участке имелись уже 5 ТЦ, индивидуальная площадь которых превышала 10 тыс. м² (см. табл. 2; добавились ТЦ № 9, № 10, № 24, № 25 и № 26). К 2023 г. численность очень крупных ТЦ увеличилась до 7 (см. табл. 2; добавились ТЦ № 17 и № 18). Обнаружен случай катастрофического увеличения индивидуальной площади ТЦ (№ 17) более чем в 8 раз — с 1,8 до 26,7 тыс. км². Это связано с чрезвычайно высокой макрорельефностью разреза, в котором до 70–80 % мощности занимает пластовый лед [23].

Отмечен более заметный рост суммарной площади всех ТЦ в первый период (2009–2018 гг.), чем во второй (2018–2023 гг.). Эта закономерность проявляется и при пересчете на один год (табл. 4). У всех ТЦ в первый период среднее за год увеличение длины превышало увеличение ширины на 71 %, и это соотношение снизилось за второй период до 33 %.

Таблица 4

Динамика параметров ТЦ для двух периодов наблюдений (2009–2018 гг., 9 лет; 2018–2023 гг., 5 лет) и в пересчете в среднем на 1 год

Table 4

Dynamics of thermocirque parameters for two observation periods (2009–2018, 9 years; 2018–2023, 5 years) and averaged for 1 year

Период	Увеличение суммарной площади, м ²				Увеличение средней длины, м				Увеличение средней ширины, м			
	Всех ТЦ		ТЦ 2009 г.		Всех ТЦ		ТЦ 2009 г.		Всех ТЦ		ТЦ 2009 г.	
	Всего	В год	Всего	В год	Всего	В год	Всего	В год	Всего	В год	Всего	В год
2009–2018	124950	13883	21060	2340	32,2	3,6	16,1	1,8	18,9	2,1	12,6	1,4
2018–2023	31717	6343	27691	5538	10,0	2,0	13,3	2,7	7,6	1,5	10,5	2,1

Рост ТЦ, которые уже существовали в 2009 г., был заметнее во второй период в абсолютном выражении (см. табл. 4). При этом, несмотря на стабилизацию части наиболее старых ТЦ к 2023 г. (см. табл. 2), в относительном выражении рост площади за оба периода сопоставим — 40 и 37 %. Рост длины ТЦ 2009 г. за все время превышал рост ширины на 29 %.

Длина ТЦ увеличивалась интенсивнее, чем ширина, в оба периода наблюдений (см. табл. 3). Это может свидетельствовать о преобладающем росте ТЦ в направлении вершины соответствующего геоморфологического урвня, а не параллельно склону.

Влияние рельефа на термоденудацию

Современная пораженность III аллювиально-морской равнины ТЦ оценивается в 4,4 %, а IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнины — в 0,5 % (см. табл. 3). При этом суммарная площадь, занятая III аллювиально-морской равниной, всего лишь в 1,4 раза больше площади, занятой IV прибрежно-морской (Казанцевской) равниной (см. рис. 2б), что может свидетельствовать о существовании на III геоморфологическом урвне наиболее благоприятных условий для развития термоденудации, заключающихся в более близком залегании к поверхности залежеобразующих льдов [18]. Из обеспеченных скважинами разрезов в районе Бованенковского месторождения [24] следует, что породы, слагающие IV прибрежно-морскую (Казанцевскую) равнину, не вскрываются существующими врезами. Тем не менее следует

отметить, что с 2009 по 2023 г. суммарная площадь ТЦ на III аллювиально-морской равнине увеличилась примерно в 4 раза, в то время как на IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнине — в 6 раз (см. табл. 3). Этот прирост выглядит менее существенным в абсолютном выражении — суммарная площадь ТЦ на III аллювиально-морской равнине за 14 лет увеличилась на 141,7 тыс. м², а на IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнине — на 15 тыс. м² (см. табл. 3).

Анализ рельефа ключевого участка позволяет заключить, что приуроченность ТЦ к склонам определенной крутизны не связана с преобладанием склонов той или иной крутизны на ключевом участке. На склонах крутизной 1–5°, занимающих наибольшую площадь участка (67,2 %), присутствуют исключительно техногенные ТЦ. Наоборот, естественные ТЦ ключевого участка расположены на склонах крутизной 5–12°, занимающих лишь 9,5 % площади ключевого участка.

Распределение числа и суммарной площади ТЦ по склонам разной экспозиции

На ключевом участке наибольшую площадь занимают склоны северо-западной экспозиции (см. рис. 2в). У склонов III аллювиально-морской равнины с градацией крутизны от 5 до 12° преобладает западная экспозиция (рис. 6а), у аналогичных по крутизне склонов IV прибрежно-морской (Казанцевской) равнины — северная экспозиция (рис. 6б).

Асимметрия в распределении площадей склонов различной экспозиции могла предопределить ориентировку сформировавшихся на них естественных ТЦ. Этим можно объяснить преобладание западной экспозиции у ТЦ 2009 г. как в общем числе (29 %), так и в суммарной площади (25 %, см. рис. 5). В связи с увеличением размера уже существующих форм (см. табл. 4) к 2018 г. доля суммарной площади ТЦ, обращенных на запад, увеличилась с 25 до 29 % (см. рис. 5). Новые ТЦ, возникшие за это время, не имели четкого преобладания тех или иных румбов и были распределены более хаотично, о чем также свидетельствует более изометричный контур распределения числа ТЦ на диаграмме (см. рис. 5). К 2023 г. скорости роста

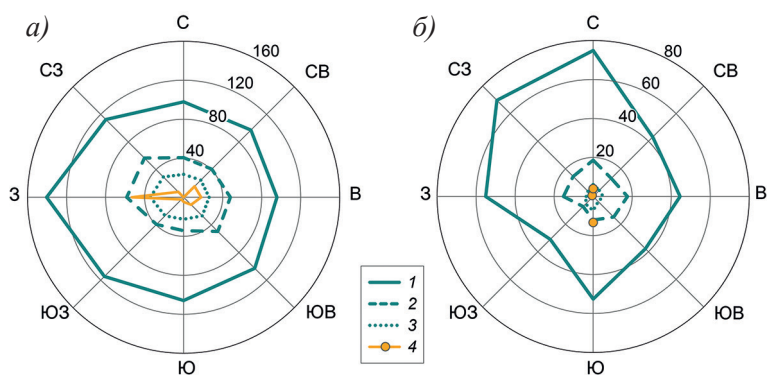


Рис. 6. Распределение площадей склонов (тыс. м²) на III аллювиально-морской (а) и IV прибрежно-морской (Казанцевской) (б) равнинах.

Склоны крутизной 1 — 5–7°, 2 — 7–9°, 3 — 9–12°; 4 — суммарная площадь естественных ТЦ, тыс. м²

Fig. 6. Distribution of slope areas (thousand m²) on III fluvial-marine (a) and IV coastal-marine (Kazantsevskaya) plains (b).

Slope steepness, 1 — 5–7°, 2 — 7–9°, 3 — 9–12°; 4 — total area of natural thermocirques (thousands m²)

старых ТЦ увеличились до 5,5 тыс. м²/год (см. табл. 4) за счет дальнейшего роста и слияния ТЦ западной экспозиции.

В отличие от естественных, техногенные ТЦ имеют преимущественно северо-западную экспозицию. Это объясняется тем, что железнодорожная насыпь, ориентированная с юго-запада на северо-восток, подрезала пологие склоны именно северо-западной экспозиции и спровоцировала образование новых ТЦ. Тем не менее дальнейшего развития техногенные ТЦ не получили, поскольку сама насыпь послужила препятствием их активного развития.

Распределение линейных размеров и средней площади ТЦ

На временной срез 2018–2023 гг. наибольшая средняя площадь естественных ТЦ наблюдается на пологих склонах 5–7° (см. рис. 4б). Более того, ТЦ на таких склонах отличаются максимальными значениями средней длины (114 м). Такая закономерность объясняется большей длиной пологих склонов и, таким образом, большей длиной зоны транзита материала к базису эрозии.

Во все годы наибольшая средняя площадь ТЦ отмечается на склонах южной экспозиции. Также у ТЦ южной экспозиции во все периоды отмечались наибольшие средние значения длины (115, 140 и 149 м в 2009, 2018 и 2023 гг.). Это часто объясняется более благоприятными условиями инсоляции южных склонов. Однако известно, что для высоких широт летом разница в инсоляции южных и северных склонов невелика ввиду полярного дня. Мы предположили, что инсоляция южных склонов может быть результатом разной облачности в разное время суток. Для проверки мы рассчитали продолжительность безоблачного периода (общая облачность — менее 10 %) в разное время суток по данным метеостанции Марресале за июль 2023 г. [25]. Статистически минимальная облачность наблюдалась примерно в то время, когда солнце освещало южные склоны (срок наблюдения 11:00 по местному времени). Наибольшая облачность в июле 2023 г. наблюдалась в 08:00 и 17:00, что по времени примерно соответствовало более слабой инсоляции юго-западных и восточных склонов. На склонах этих же экспозиций в 2023 г. наблюдались минимальные значения средней площади ТЦ (см. рис. 5б). Таким образом, сочетание двух факторов (инсоляция и суточная динамика облачности) могло обеспечить наиболее благоприятные условия для роста ТЦ на склонах южной экспозиции.

Сравнение с другими исследованиями термоцирков в Российской Арктике

Динамика ТЦ на выбранном ключевом участке сопоставлена с исследованиями активизации ТЦ на всей территории стационара «Васькины Дачи» [26]. Согласно [26], за период 2010–2018 гг. число активных ТЦ на стационаре увеличилось вдвое, а на нашем ключевом участке за период 2009–2018 гг. — в 1,8 раза.

Из [4] следует, что на Центральном Ямале наиболее высокие темпы роста отмечаются для ТЦ, развивающихся на южных склонах. Для всего севера Западной Сибири выделено большее количество ТЦ западной, южной и северной экспозиций [27]. В исследовании [14] для участков с высокой плотностью ТЦ (Центральный Ямал и Центральный Гыдан) выявлено преобладание ТЦ юго-западной экспозиции.

В других районах криолитозоны Евразии исследователи неоднократно отмечали влияние экспозиции склонов на ход термоденудации. Для севера Якутии выявлены высокие скорости отступания стенок ТЦ с южной экспозицией [28, 29]. В Центральной Якутии 40 % ТЦ имеют юго-восточную и восточно-юго-восточную экспозиции [8]. Таким образом, однозначных результатов не получено, они в значительной степени зависят от размера выборки даже для одного региона.

Наиболее полная выборка ТЦ на севере Западной Сибири рассмотрена в [21]. Медианное значение крутизны склонов для Ямала составило $2,5^\circ$, что существенно ниже наших оценок приуроченности естественных ТЦ к склонам на ключевом участке (см. рис. 4). Это связано с тем, что авторы цитируемой работы оценивали крутизну всего макросклона, а не поверхности внутри контура ТЦ.

Сравнение с исследованиями термоцирков Северной Америки

Средняя площадь ТЦ на многих территориях Северной Америки значительно выше, чем на выбранном ключевом участке. На общем фоне выделяются данные, полученные по результатам исследования ТЦ в северо-западном Юконе в 2011 г. [5]. Средняя площадь местных ТЦ (2400 м^2) была близка к средней площади ТЦ на нашем ключевом участке в 2009 г. (2939 м^2). В работе зарубежных коллег использовались аналогичные материалы сверхвысокого пространственного разрешения (космические снимки GeoEye-1 и WorldView-2).

Медианные значения крутизны ТЦ в северо-западном Юконе составили $6,2^\circ$ [5], что сопоставимо со значениями на нашем ключевом участке ($8,2^\circ$). Также близка к нашим значениям крутизна ТЦ в северной части долины р. Маккензи — разброс значений для выборки из 15 ТЦ составил от 4 до $12,1^\circ$ [7]. При этом максимальные темпы роста наблюдались у ТЦ с крутизной выше 8° . На нашем ключевом участке в 2009–2018 гг. наибольшее увеличение суммарной площади старых ТЦ аналогично пришлось на схожие склоны крутизной 7 – 9° (см. рис. 4б). Значительно ниже крутизна ТЦ на о. Элсмир (район м/с Юрика) — диапазон значений здесь изменяется от 2 до 7° [9].

На о. Бэнкс в 1960–2004 гг. и в западном Нунавуте в 1952–2006 гг. [3] увеличение суммарной площади ТЦ превышало рост их числа. В восточной части дельты р. Маккензи основной прирост суммарной площади ТЦ в 1950–2004 гг. также происходил за счет расширения ранее образованных ТЦ [30]. Такой характер динамики выявлен и на нашем ключевом участке Центрального Ямала.

Наибольшую сложность представляет рассмотрение влияния экспозиции на различные параметры ТЦ. Для выборки из 541 ТЦ в восточной части дельты р. Маккензи отмечено численное преобладание ТЦ на склонах северной, восточной и западной экспозиций. Такой характер распределения сохраняется на протяжении 50 лет как для старых, так и для наиболее молодых ТЦ [30]. Для смежного участка Канадской Арктики (район между пос. Тактояктук и г. Инувик) преобладающие экспозиции ТЦ определены как северо-западная и северо-восточная [12], однако при оценке распределения румбов учитывались суммарные площади ТЦ.

В исследованиях с ограниченными наборами данных делаются менее однозначные выводы. Число ТЦ в выборках таких исследований не превышает 10–15. Отмечается отсутствие какой-либо взаимосвязи между экспозицией стенки ТЦ и скоростью ее отступления в долине р. Ноатак на Аляске [10] и в северной части долины р. Маккензи [7].

Влияние экспозиции на скорости роста ТЦ установлено для островов Канадского Арктического архипелага. Э. Левкович [31] отмечал повышенные (по сравнению с другими районами Канадской Арктики) скорости роста ТЦ с южной и западной экспозициями на о. Бэнкс. Из данных полевых наблюдений и аэрофотосъемки также следует вывод о преобладающем росте ТЦ в сторону вершины, а не параллельно склону. На о. Элсмир подавляющее большинство форм приурочено к южным румбам [9].

Статистически достоверные данные обработки большой выборки для конкретного региона, как правило, дают заметную корреляцию между распространением ТЦ и ключевыми параметрами рельефа. Менее вероятно получить такие корреляции при рассмотрении локальной выборки.

Выводы

1. Абсолютное большинство ТЦ (90 %) на ключевом участке Центрального Ямала приурочено к склонам III аллювиально-морской равнины, что не соответствует доле таких склонов на ключевом участке. Наиболее вероятной причиной такого распределения являются наименьшие глубины залегания залежеобразующих льдов на этом геоморфологическом уровне.

2. С 2009 по 2023 г. число ТЦ на ключевом участке увеличилось на 61,1 %, а суммарная площадь — на 296,2 %. Увеличивается число особо крупных (более 10 тыс. м²) ТЦ — с 5 в 2018 г. до 7 в 2023 г. В 2009–2018 гг. ТЦ росли быстрее, чем в 2018–2023 гг., видимо, как следствие климатических экстремумов 2012 и 2016 гг.

3. Несмотря на выраженное преобладание на участке поверхностей с уклоном 1–5°, естественные ТЦ развиты исключительно на склонах 5–12°. Этот диапазон важен при оценке уязвимости территории к возникновению ТЦ. Наблюдаемое снижение значений крутизны ТЦ по мере их роста связано с их отступанием вверх по склону и захватом более пологих приводораздельных частей.

4. Большие площади западных склонов на участке объясняют более высокую суммарную площадь ТЦ на склонах западной экспозиции. Тем не менее в распределении ТЦ по склонам различных экспозиций наблюдается много случайных отклонений от медианных значений, видимо, ввиду ограниченной выборки.

5. Средние площади и значения длины ТЦ во все годы максимальны на склонах южной экспозиции. Преобладает рост ТЦ вверх по склону, а не расширение по простиранию склона.

6. Значения средних площадей ТЦ на ключевом участке Центрального Ямала близки к таковым на северо-западе территории Юкон. Аналогично о. Бэнкс, западному Нунавуту и дельте р. Маккензи, увеличение суммарной площади анализируемых ТЦ Центрального Ямала превышало рост их числа. Расхождения результатов анализа влияния рельефа на ТЦ в разных исследованиях обусловлены как разницей в методиках и пространственном разрешении материалов дистанционного зондирования, так и региональными особенностями территорий (рельеф поверхности, преобладающая экспозиция склонов, глубина залегания и тип залежеобразующих льдов).

7. Склоны III аллювиально-морской равнины крутизной 5–12°, обращенные к западу, отличаются большим числом и площадями естественных ТЦ во все годы. Именно на них ожидается наиболее интенсивный рост существующих ТЦ.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Сотрудники Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН И.И. Тарасевич, М.О. Лейбман и А.В. Хомутов выполнили работу в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012). Сотрудник МГУ имени М.В. Ломоносова А.И. Кизяков поддержан государственным заданием «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (#121051100164-0). Сотрудница Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера Н.Б. Нестерова поддержана стипендией DAAD (Грант #57588368).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Центру коллективного пользования «Геопортал МГУ» (ЦКП УНО «Геопортал с оперативным наполнением и комплексом обучения и обработки информации

космических снимков») за предоставление космических снимков GeoEye-1 и WorldView-2, использованных в работе.

Вклад авторов. И.И. Тарасевич — подготовка и редактирование текста, составление методики, визуализация, анализ литературы; М.О. Лейбман — концепция исследования, руководство, доработка методики, доработка текста; А.И. Кизяков — руководство, доработка методики, доработка текста; Н.Б. Нестерова — анализ литературы, доработка текста; А.В. Хомутов — доработка текста.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. I.I. Tarasevich, M.O. Leibman, and A.V. Khomutov, researchers at the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, carried out the work within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FWRZ-2021-0012). A.I. Kizyakov, a researcher at Moscow State University, was supported by the state assignment «Evolution of the cryosphere under climate change and anthropogenic impact» (#121051100164-0). N.B. Nesterova, a researcher at the Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research, was supported by a DAAD fellowship (Grant #57588368).

Acknowledgments. The authors express their gratitude to the Center for Collective Use «MSU Geoportal» (The Center for Collective Use of Scientific Equipment «Geoportal with operational content and a complex for training and processing information from space images») for providing the GeoEye-1 and WorldView-2 space images used in the paper.

The authors' contribution. I.I. Tarasevich — text preparation and editing, methodology development, visualization, literature analysis; M.O. Leibman — research concept, supervision, methodology revision, text revision; A.I. Kizyakov — supervision, methodology revision, text revision; N.B. Nesterova — literature analysis, text revision; A.V. Khomutov — text revision.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Воскресенский К.С. *Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России*. М.: Изд-во географического ф-та МГУ; 2001. 262 с.
2. Лейбман М.О., Кизяков А.И. *Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова*. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.
3. Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic. *Environmental Research Letters*. 2016;11(3):034025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034025>
4. Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques in Central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Mikoš K., Vilimek V., Yin Y., Sassa K. (eds). *Advancing culture of living with landslides*. WLF 2017. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. P. 209–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_24
5. Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzs Schuh U., Morgenstern A., Couture N., Lantuit H. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2017;122(9):1619–1634. <https://doi.org/10.1002/2017JF004231>
6. Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факашук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород. *Метеорология и гидрология*. 2019;4:99–109.
Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashuk N.Yu., Khairullin R.R., Khomutov A.V. 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;44(4):283–290. <https://doi.org/10.3103/S1068373919040083>

7. Wang B., Paudel B., Li H. Retrogression characteristics of landslides in fine-grained permafrost soils, Mackenzie Valley, Canada. *Landslides*. 2009;6:121–127. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0150-y>
8. Séjourné A., Costard F., Fedorov A., Gargani J., Skorve J., Massé M., Mège D. Evolution of the banks of thermokarst lakes in Central Yakutia (Central Siberia) due to retrogressive thaw slump activity controlled by insolation. *Geomorphology*. 2015;241:31–40. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.033>
9. Ward Jones M.K., Pollard W.H., Jones B.M. Rapid initialization of retrogressive thaw slumps in the Canadian high Arctic and their response to climate and terrain factors. *Environmental Research Letters*. 2019;14(5):055006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab12fd>
10. Swanson D.K., Nolan M. Growth of retrogressive thaw slumps in the Noatak Valley, Alaska, 2010–2016, measured by airborne photogrammetry. *Remote Sensing*. 2018;10(7):983. <https://doi.org/10.3390/rs10070983>
11. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., Romanovsky V.E., Boike J. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nature communications*. 2018;9(1):5423. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3>
12. Zwieback S., Kokelj S.V., Günther F., Boike J., Grosse G., Hajnsek I. Sub-seasonal thaw slump mass wasting is not consistently energy limited at the landscape scale. *The Cryosphere*. 2018;12(2):549–564. <https://doi.org/10.5194/tc-12-549-2018>
13. Yang Y., Rogers B.M., Fiske G., Watts J., Potter S., Windholz T., Mullen A., Nitze I., Natali S.M. Mapping retrogressive thaw slumps using deep neural networks. *Remote Sensing of Environment*. 2023;288:113495. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113495>
14. Bernhard P., Zwieback S., Bergner N., Hajnsek I. Assessing volumetric change distributions and scaling relations of retrogressive thaw slumps across the Arctic. *The Cryosphere*. 2022;16(1):1–15. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1-2022>
15. Runge A., Nitze I., Grosse G. Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr. *Remote Sensing of Environment*. 2022;268:112752. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112752>
16. Leibman M.O., Khomutov A.V., Gubarkov A.A., Dvornikov Y.A., Mullanurov D.R. The research station “Vaskiny Dachi”, Central Yamal, West Siberia, Russia — a review of 25 years of permafrost studies. *Fennia*. 2015;193(1):3–30. <https://doi.org/10.11143/45201>
17. Данилов И.Д. *Плейстоцен морских субарктических равнин*. М.: Изд-во МГУ; 1978. 198 с.
18. Дубиков Г.И. *Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири*. М.: ГЕОС; 2002. 246 с.
19. Esri. *World Imagery Basemap*. URL: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html> (accessed 17.04.2024).
20. Porter C., Howat I., Noh M.-J., Husby E., Knuvis S., Danish E., Tomko K., Gardiner J., Negrete A., Yadav B., Klassen J., Kelleher C., Cloutier M., Bakker J., Enos J., Arnold G., Bauer G., Morin P. *ArcticDEM — Strips, Version 4.1*. 2022. URL: <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS> (accessed 16.04.2024).
21. Leibman M., Nesterova N., Altukhov M. Distribution and morphometry of Ttermocirques in the north of West Siberia, Russia. *Geosciences*. 2023;13(6):167. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060167>
22. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. URL: https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf (дата обращения: 11.06.2024).
23. Тарасевич И.И., Письменюк А. А., Нестерова Н. Б., Хайруллин Р. Р. Комплексные исследования термоцирков на Центральном Ямале по данным дистанционных и полевых наблюдений.

- В кн.: *Материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, с международным участием в г. Нерюнгри, посвященной 30-летию юбилею Технического института (филиала) СВФУ им. М.К. Аммосова, 28–29 октября 2022 г.* Якутск; 2021. С. 170–175. https://doi.org/10.52994/9785751333737_042
24. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала. *Криосфера Земли*. 2002;33(12):15–24. Streletskaia I.D., Leibman M.O. Cryogeochemical interrelation of massive ground ice, cryopegs, and enclosing deposits of Central Yamal. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2002;33(12):15–24. (In Russ.)
25. *Архив погоды в Марресале*. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Марресале (дата обращения: 02.07.2024)
26. Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):222–237. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237> Khomutov A.V., Babkina E.A., Khairullin R.R., Dvornikov Yu.A. Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity on central Yamal in 2010–2018. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):222–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>
27. Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов. *Криосфера Земли*. 2021;25(6):41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604> Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O., Safonov T.A., Belova N.G. The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of West Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic. *Earth's Cryosphere*. 2021;25(6):34–41. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
28. Максимов В.В. Итоги многолетних наблюдений за термоденудацией бортов карьеров в отложениях ледового комплекса. *Методы изучения криогенных физико-геологических процессов*. Сб. науч. тр. М.: ВСЕГИНГЕО; 1992. С. 60–71.
29. Пижанкова Е.И. Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). *Криосфера Земли*. 2011;15(3):61–70. Pizhankova E.I. Termodenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky Islands (interpretation of aerospace images). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2011;15(3):61–70. (In Russ.)
30. Kokelj S.V., Lantz T.C., Kanigan J., Smith S.L., Coutts R. Origin and polycyclic behaviour of Tundra thaw slumps, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and periglacial processes*. 2009;20(2):173–184. <https://doi.org/10.1002/ppp.642>
31. Lewkowicz A.G. Nature and importance of thermokarst processes, sand hills moraine, Banks island, Canada. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 1987;69(2):321–327. <https://doi.org/10.1080/04353676.1987.11880218>