

## ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237>

УДК 551.343+551.435.627



### Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг.

А.В. Хомутов<sup>1</sup>✉, Е.А. Бабкина<sup>1</sup>, Р.Р. Хайруллин<sup>2</sup>, Ю.А. Дворников<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

<sup>2</sup> ООО «b.geos», Корнойбург, Австрия

<sup>3</sup> Лаборатория Smart Urban Nature, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

<sup>4</sup> Лаборатория карбониторинга наземных экосистем, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия

✉ [artcryo@yandex.ru](mailto:artcryo@yandex.ru)

АВХ, 0000-0001-8855-3483; ЕАБ, 0000-0002-1426-6091; РРХ, 0000-0002-4948-8938;  
ЮАД, 0000-0003-3491-4487

**Аннотация.** Рассмотрены климатические факторы активизации термоденудационных процессов, приводящих к образованию термоцирков, в центральной части полуострова Ямал. На основе сопоставления разновременных дистанционных материалов, сопровождавшегося анализом климатических данных, проведен анализ активности термоцирков в период 2010–2018 гг. Помимо «классических» термоцирков, характеризующихся в анализируемый временной период разной степенью активности, выделено существенное количество эмбриональных термоденудационных форм.

**Ключевые слова:** изменение климата, многолетнемерзлые породы, подземный лед, полуостров Ямал, сезонное протаивание, термоденудация, термоцирк

**Для цитирования:** 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>

Поступила 29.02.2024

После переработки 02.05.2024

Принята 08.05.2024

## Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity on central Yamal in 2010–2018

Artem V. Khomutov<sup>1</sup>✉, Elena A. Babkina<sup>1</sup>, Rustam R. Khairullin<sup>2</sup>,  
Yury A. Dvornikov<sup>3,4</sup>

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

<sup>2</sup> b.geos GmbH, Korneuburg, Austria

<sup>3</sup> Smart Urban Nature Laboratory, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Laboratory of Carbon Monitoring in Terrestrial Ecosystems, Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

✉ [artcryo@yandex.ru](mailto:artcryo@yandex.ru)

 AVK, 0000-0001-8855-3483; EAB, 0000-0002-1426-6091; RRK, 0000-0002-4948-8938; YAD, 0000-0003-3491-4487

**Abstract.** The paper presents research findings of the climatic factors responsible for the activation of thermal denudation processes leading to the formation of thermocirques in the central part of the Yamal Peninsula in the north of West Siberia. Based on a comparison of multi-temporal remote sensing (2010, 2013 and 2018) coupled with climate data, an analysis of the thermocirques activity in 2010–2018 was carried out. Thermocirques are specific topographic forms that arise because of the activation of cryogenic earth flows, the formation of which is caused by an increased seasonal thawing of the upper part of the ground ice on the slopes as compared to the previous years. Analysis of the monitoring data showed that in 2012 and 2013 all the types of surfaces are characterized by a significant increase in seasonal thawing compared to the previous period 1993–2011 (12 % increase on slopes), due to the summer air temperature, the amount of summer precipitation and the increased duration of the warm period. The results of the thermocirques activity analysis are shown on a map. The results of this local study were compared with those of a regional (Yamal and Gydan Peninsulas) remote sensing study of thermocirques. This showed a higher accuracy of the local study based on field monitoring and very-high-resolution satellite imagery. The analysis of the thermocirques activity showed that 1) over the period from 2010 to 2018 thermal denudation activity in the study area increased due to the anomalous climatic conditions in the spring-summer season of 2012, and then gradually decreased; 2) in addition to “classical” thermocirques, which were at different stages of activity in the time periods analyzed (2010, 2013 and 2018), a significant number of embryonic thermocirques were identified. Such thermocirques, just as the majority of small “classical” thermocirques, can only be identified on very-high-resolution satellite imagery.

**Keywords:** climate change, ground ice, permafrost, seasonal thawing, thermal denudation, thermocirque, Yamal Peninsula

**For citation:** Khomutov A.V., Babkina E.A., Khairullin R.R., Dvornikov Y.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>

Received 29.02.2024

Revised 02.05.2024

Accepted 08.05.2024

### Введение

Широкое распространение термоденудационных форм рельефа связано с воздействием как тепла, так и морских волн на неглубоко залегающие пластовые льды, и достаточно хорошо изучено [1, 2]. Важное место среди исследований криолитозо-

ны Арктики занимают вопросы, касающиеся устойчивости многолетнемерзлых пород в условиях меняющегося климата, в том числе при проявлении термоденудационных процессов [1, 3–5 и многие др.]. В евразийской и североамериканской Арктике с начала текущего столетия в связи с климатическими колебаниями отмечается активизация темпов термоденудации и термоабразии, связанных с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов [6–10], а также сопутствующих криогенных процессов в парагенезе с термоденудацией: термоэрозии, термокарста, криогенного оползания, солифлюкции, пучения и др. [2, 11]. Проявление термоденудационных процессов выражается в деформации поверхности и образовании отрицательных форм рельефа — термоцирков [1, 12, 13]. Установлено, что скорость отступания бровок термоцирков зависит от поступления летнего тепла, а также от льдистости геологического разреза [14–16]. Повышение температуры воздуха определяет скорость оттаивания льда и мерзлых пород в береговых уступах [1, 7 и др.], приводит к увеличению глубины протаивания и к последующему достижению сезонным протаиванием кровли пластовых льдов на склонах, что приводит к зарождению термоцирков [14, 17]. Результаты наблюдений на берегах Карского моря свидетельствуют о том, что высокие скорости разрушения берегов в 2007–2010 гг. связаны с активизацией термоденудации [4, 18]. Поскольку в разрушении морских берегов принимает участие и волновая деятельность, снижение ледовитости Карского моря также должно резко повысить скорости разрушения берегов. Совместный анализ полевых наблюдений и данных дистанционного зондирования позволил определить скорости роста термоцирков на о. Колгуев (Баренцево море) в 2009–2012 гг., достигавшие 14,5–15,1 м/год при средних скоростях около 2,6 м/год [12], и это при относительно невысокой толщине ледяных тел в береговых обрывах.

На формирование термоцирков, а также их дальнейшее развитие оказывает влияние изменение климатических характеристик. Например, в канадской Арктике в центральной части дельты р. Маккензи спрогнозировано увеличение темпов роста термоцирков в местах повышенной льдонасыщенности с учетом возрастания скоростей роста термоцирков в 1973–2004 гг. в 1,4 раза по сравнению с предыдущим периодом 1950–1973 гг. [19].

Недавняя активизация термоденудации за пределами береговой зоны [13] обозначила вопрос изучения динамики поверхности термоцирков, условий их активизации или, наоборот, стабилизации и зарастания в совершенно иной обстановке относительно термоцирков, развивающихся непосредственно на морских побережьях. Решение этого вопроса, уточнение характера развития термоденудационных процессов, связанных с формированием специфических форм рельефа — термоцирков, на континентальных арктических равнинах Карского региона в глубине суши является отдельной актуальной задачей.

В этой статье рассмотрены климатические факторы активизации термоденудационных процессов, приводящих к образованию термоцирков, и проведен анализ активности термоцирков в период 2010–2018 гг. в центральной части полуострова Ямал.

### **Район работ**

В 2012–2013 гг. в центральной части полуострова Ямал в окрестностях научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» (рис. 1а) зафиксировано массовое формирование термоцирков. На рис. 1б представлен наиболее крупный термоцирк, наблюдавшийся во время проведения исследования, а на рис. 1в — термоцирк, характеризовавшийся двумя активными стадиями с 2012 и с 2016 г., разделенными стадией зарастания (согласно полевым наблюдениям в 2013–2019 гг.).

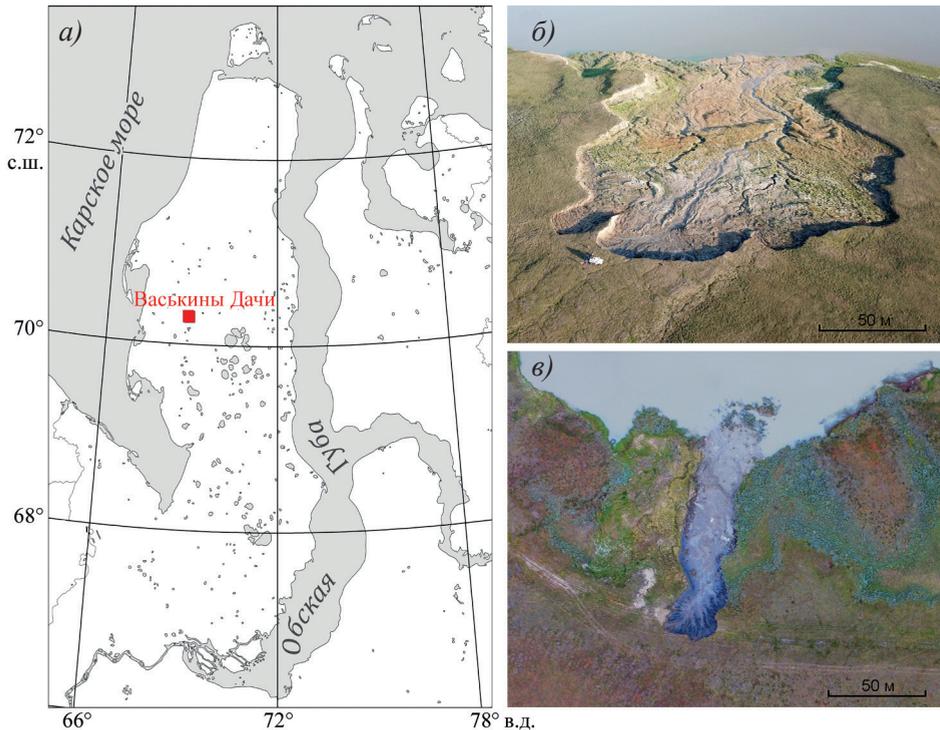


Рис. 1. Местоположение научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» на полуострове Ямал (а), примеры термоцирков — ТЦ-1 (фото А.В. Хомутова с применением БПЛА, август 2019 г.) (б) и ТЦ-4,4а (фото А.В. Хомутова с применением БПЛА, август 2017 г.) (в)  
 Fig. 1. Location of research station “Vaskiny Dachi” on the Yamal Peninsula (a), examples of thermocirques — TC-1 (photo by A.V. Khomutov using UAV, August 2019) (b) and TC-4,4a (photo by A.V. Khomutov using UAV, August 2017) (c)

Район работ расположен на междуречье рек Се-Яха и Морды-Яха и представляет собой холмисто-увалистую равнину с узкими водоразделами и длинными пологими склонами, расчлененную узкими долинами малых рек и водотоков, овражно-балочной сетью, озерами и хасырями. Глубина расчленения казанцевской и салехардской равнин достигает 40–50 м. Около 60 % территории занято пологими склонами крутизной до 7°, склоны крутизной от 7 до 50° занимают около 10 % площади, а оставшиеся 30 % приходятся на вершинные части увалов, поймы рек и озера. На водораздельных поверхностях активно морозобойное расстрескивание пород с образованием повторно-жильных льдов на торфяниках, распространенных в седловинах, и песчаных и песчано-ледяных жил на вершинах. В криолитологическом строении принимают участие песчаные породы со значительным содержанием пылеватых частиц. Склоновые отложения характеризуются песчаным составом вблизи бровки. Вниз по склону они сменяются супесчаными и суглинистыми, а подстилаются глинистыми породами. Важнейшим компонентом криогенного строения являются пластовые льды, которые распространены практически повсеместно и на изучаемой территории вскрывались на глубинах от 4 до 25 м скважинами при проведении изысканий для строительства ж/д линии

Обская–Бованенково. Активное развитие склоновых процессов характерно для останцов морских террас, сложенных высокольдистыми породами с залежами пластовых льдов [14].

Глубина сезонного протаивания в среднем не превышает 1,5 м на слабозадернованных поверхностях вершин с песчаными породами и сильнозадернованных поверхностях с высокими кустами и 0,9–1,0 м на задернованных поверхностях плоских водоразделов и склонов преимущественно с суглинистыми породами [17]. Средняя годовая температура пород на подошве сезонно-талого слоя изменяется от положительных значений на сильнозадернованной поверхности с высокими кустами до  $-5,2$  °С на незадернованной вершинной поверхности. На глубине 10 м в скважине на незадернованной поверхности с песчаными породами с 2011 по 2018 г. средняя годовая температура пород увеличилась с  $-6,2$  до  $-5,6$  °С. Территория вокруг стационара «Васькины Дачи» достаточно давно известна как опорный ключевой участок для изучения термоденудационных процессов [20]. Однако до 2013 г. основное внимание уделялось изучению криогенных оползней скольжения, связанных с формированием льдистого горизонта на подошве сезонно-талого слоя [14, 21, 22].

### **Методы исследования**

Для проведения анализа активности термоцирков применен комплекс методов, включающих как непосредственные наблюдения в полевых условиях, так и интерпретацию данных дистанционного зондирования.

Активность термоцирков по территории исследования анализировалась на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (от 0,41 до 0,61 м) нескольких съемочных систем за разные годы: QuickBird-2 за 30 июля 2010 г., GeoEye-1 за 5 июля 2013 г., WorldView-2 за 21 июля 2013 г. (Digital Globe Foundation©) и WorldView-2, 3 за 10 июля 2018 г.

При уточнении дешифровочных признаков анализируемых термоцирков для некоторых из них использованы материалы БПЛА-съемки — ортофотопланы, фактически являющиеся аналогами космических снимков с еще более сверхвысоким пространственным разрешением, но на значительно меньшие участки интереса. Построение ортофотопланов производилось в ПО Agisoft Metashape на основе изображений с камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате. Обработка данных дистанционного зондирования, ортофотопланов и векторных геоданных проводилась в ПО ArcGIS.

Объекты дешифрировались исходя из наличия детальных материалов полевых исследований, в том числе ортофотопланов, на ключевые и другие эпизодически посещаемые термоцирки, по методу подобия спектральных характеристик на имеющихся космических снимках.

Климатическая составляющая активизации и последующего развития термоденудации, приводящей к образованию термоцирков, анализировалась с использованием данных о средней годовой температуре воздуха, о суммах летних температур (индекса оттаивания), о суммах зимних температур (индекса промерзания), о суммах летних и зимних атмосферных осадков по данным ближайшей метеостанции Марресале [23]. Используются данные многолетнего мониторинга глубины протаивания многолетнемерзлых пород в районе стационара [17], в том числе полученные авторами.

## Результаты

Климатические колебания второго десятилетия текущего столетия, включая экстремально теплую в изучаемом районе весну 2012 г., лето 2013 г., а в дальнейшем и частично лето 2016 г. [13, 23], привели к массовой активизации криогенных оползней течения, причиной формирования которых является достижение сезонным протаиванием кровли пластовых льдов на склонах и повышенное по сравнению с предыдущими годами протаивание верхней части залежи этого льда [14].

Как показал анализ данных мониторинга глубины протаивания [17] в 2012 и 2013 гг., все типы поверхностей характеризуются значительным увеличением глубины протаивания по сравнению с предыдущим периодом 1993–2011 гг. (от 12 % на склоновых до 20 % на вершинных поверхностях). А в 2016 г. произошло еще более резкое увеличение глубины протаивания (на величину от 24 до 37 %) относительно периода 1993–2011 гг.

Такие изменения связаны в основном с ростом летней температуры воздуха, с увеличением количества летних осадков, а также с увеличением продолжительности теплого периода. В 2012 и 2016 гг. отмечены как самые высокие суммы положительных температур, самые большие суммы летних осадков, так и самые продолжительные периоды с положительной среднесуточной температурой воздуха (табл. 1). Кроме того, в летние периоды 2012 и 2016 гг. и в предвещающие их зимние периоды совпали благоприятные условия для формирования более высокой, чем когда-либо за период наблюдений, глубины протаивания и активизации криогенных оползней течения. Фактически в 2012 г. теплый период начался 28 мая, при этом с самого начала наблюдалась нетипично высокая температура воздуха [23].

Так как минимальная глубина залегания пластовых льдов, вскрывающихся в стенках термоцирков, по нашим наблюдениям, составляет 2 м, при определенных условиях на склонах, в частности в условиях морозобойного растрескивания поверхности, эта глубина может быть достигнута сезонным протаиванием в наиболее теплые годы. Это и произошло в 2012 г. [13]. В 2016 г. не отмечено массового повторения этого явления и возникновения большого числа новых криогенных оползней течения, а затем термоцирков. Скорее всего, это связано с меньшим количеством летних осадков, а все склоны, потенциально благоприятные для развития процесса, были уже разгружены в 2012 г. Подобная ситуация была в 1989–1990 гг., когда в 1989 г. произошел массовый сход криогенных оползней скольжения [14, 21], а в более теплое 1990 г. повторения оползания не было, так как склоны уже разгрузились.

После формирования криогенных оползней течения климатические факторы (метеорологические параметры) начинают действовать на мерзлую стенку отрыва термоцирка напрямую. К такому воздействию относится влияние солнечной радиации и атмосферных осадков на лишенную изолирующего растительного слоя поверхность подземного льда либо сильнольдистой многолетнемерзлой породы. Тем самым определяется скорость развития термоцирка на фоне других влияющих условий, в которых развивается термоцирк (экспозиция склона, мощность залежи подземного льда, тип подземного льда и т. д.).

Очевидно, что процессы термоденудации, как и другие процессы, характерные для криолитозоны с подземными льдами, развиваются на протяжении всего времени после формирования подземных льдов. При этом на общие климатические тренды накладываются местные микроклиматические, литологические и другие факторы.

Таблица 1

Table 1

Климатические факторы активности термоцирков, по данным м/с Марресале [23] и ежегодного мониторинга

Climatic factors of thermocirques activity, based on datasets of the Marresale weather station [23] and annual monitoring

Годы	$T_{\text{возд.0,07}}$ , °C	Теплый период						Холодный период				
		Глубина протаивания, см		Индекс оттаивания, градусо-дни		Продолжительность, дни		Сумма летних осадков, мм		Годы	Индекс промерзания, градусо-дни	Сумма зимних осадков
		Вершины	Склоны	1	2	1	2	1	2			
Среднее за 1993–2011	-7,0	90	87	568	719	92	131	99	152	Среднее за 1993/94—2010/11	-3254	152
2012	-4,1	101	94	870	1054	98	147	184	233	2011/12	-2332,73	135
2013	-7,3	102	96	656	748	87	110	129	150	2012/13	-3109,86	144,5
2014	-7,7	90	87	393	492	81	117	115	151	2013/14	-3292,45	202,6
2015	-5,2	100	95	764	913	112	141	133	179	2014/15	-3026,83	195,8
2016	-3,7	115	109	1409	1427	151	163	174	196	2015/16	-2437,3	127,3
2017	-4,6	98	93	705	817	94	132	47	77	2016/17	-3120,72	150,6
2018	-6,1	92	83	457	720	83	133	123	194	2017/18	-2778,25	232,3
2019	-5,3	93	88	658	823	74	122	66	150	2018/19	-2609,84	185

Примечание. 1 — до даты измерения глубины протаивания, 2 — за теплый период.

Note. 1 — to date of thawing thickness measurement, 2 — total.

Так как проанализированные климатические данные (см. табл. 1) свидетельствуют о том, что именно летний сезон 2012 г. был наиболее благоприятным для развития термоденудации, не вызывает сомнений, что усиление активности процесса произошло в летний сезон 2012 г. Утверждать, что такое усиление активности термоденудационных процессов, связанных с вытаиванием подземных льдов, произошло именно на фоне аномально теплых климатических условий 2012 г., позволяют и прямые полевые наблюдения на некоторых участках. В 2011 г. термоцирки не наблюдались. В 2012 г. при полевой съемке был обнаружен новый термоцирк, отсутствующий на космическом снимке 2010 г. На космическом снимке GeoEye-1 за 5 июля 2013 г. во многих депрессиях, включая дешифрируемые как свежие термоцирки, наблюдались снежники. Это исключает возможность начала формирования термоцирков в 2013 г. Таким образом, большинство свежих наблюдаемых по космическим снимкам 2013 г. термоцирков наиболее вероятно начало формироваться в теплый период 2012 г. в результате достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда или сильнольдыстых многолетнемерзлых пород. Исключение составляют термоцирки, наблюдаемые как активные на космическом снимке 2010 г.

К 2018 г., согласно используемым данным дистанционного зондирования, на территории исследования насчитывалось 158 объектов, дешифрируемых как термоцирки, но характеризующихся разной активностью на три временных среза, которые определяются датами дистанционной съемки: 2010, 2013 и 2018 гг. (табл. 2). Все эти термоцирки показаны на карте (рис. 2). Учитывая имеющийся неполный охват дистанционными материалами 2010 и 2018 гг. территории, покрытой космическими снимками 2013 г., активность термоцирков, попавших в эти зоны неполного покрытия, в 2010 или 2018 гг. оценивалась экспертно на основе степени активности по состоянию на даты с доступными данными дистанционного зондирования для участков развития термоцирков. Для 22 объектов отсутствует покрытие в 2010 г., для других 17 — в 2018 г. Соответственно, для первых оценивалась вероятность их наличия в 2010 г. по имеющимся данным 2013 и 2018 гг., а для вторых — наиболее вероятный сценарий их развития в 2018 г. на основе данных 2010 и 2013 гг.

В общем термоцирки подразделяются на активные (стадия активизации) и зарастающие/заросшие (стадия зарастания или стабилизации). К активным отнесены объекты, характеризующиеся наличием активной стенки, в которой, согласно имею-

Таблица 2

## Стадии активности термоцирков (ТЦ) в 2010–2018 гг.

Table 2

## Stages of thermocirques (TC) activity in 2010–2018

Год	Класс ТЦ по набору стадий активности									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Э*
2010	+	x	z	+	z	x	z	+	z	+
2013	+	+	+	+	z	+	+	z	z	+
2018	+	+	+	z	+	z	z	z	z	+
Количество ТЦ	6	19	15	12	1	24	16	1	33	31

*Примечание.* Стадии активности: + — активизации; z — зарастания; x — ТЦ отсутствует; \*Э — эмбриональные термоцирки.

*Note.* Activity stages: + — activation; z — overgrowing; x — TC absent; \*Э — embryonic thermocirques.

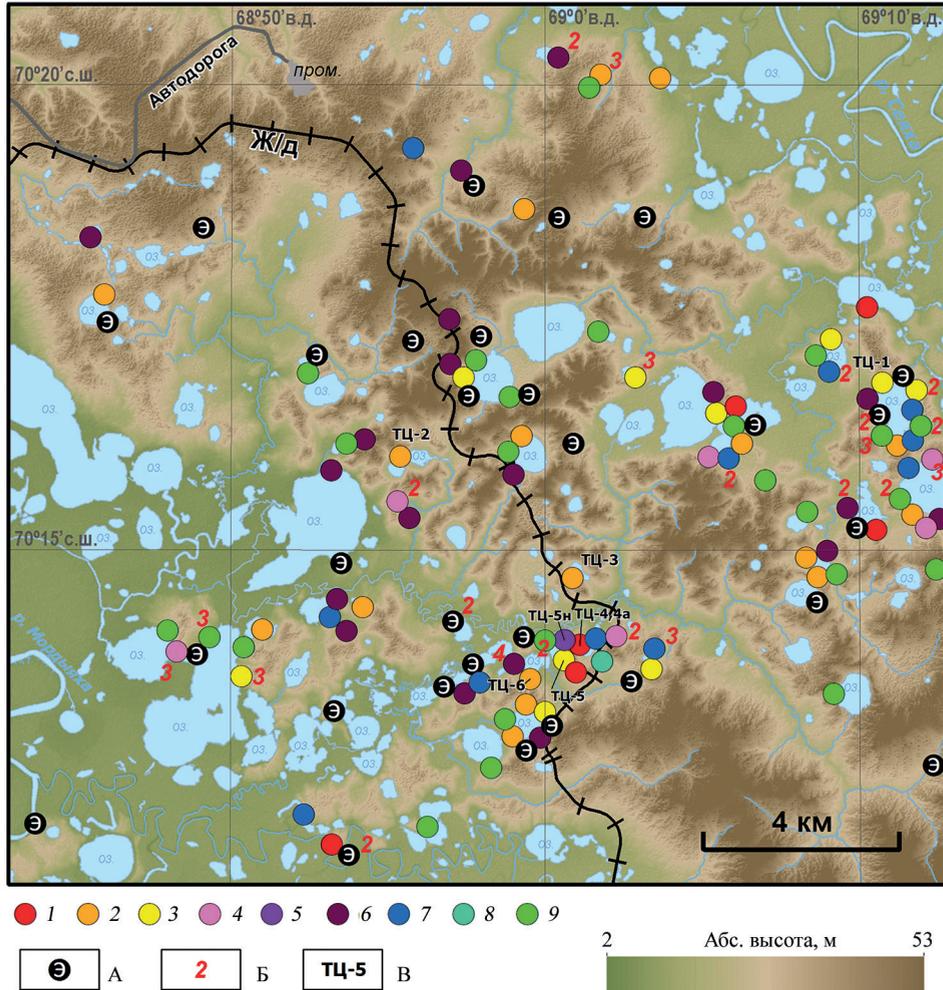


Рис. 2. Карта термоцирков (ТЦ) с разной активностью в 2010, 2013 и 2018 гг.

1–9 — класс ТЦ, согласно табл. 2; А — эмбриональные ТЦ, согласно табл. 2; Б — число рядом расположенных ТЦ одного класса; В — индексы ТЦ, регулярно наблюдаемых с 2012–2013 гг.

Fig. 2. Map of thermocirques (TC) with different activity in 2010, 2013 and 2018.

1–9 — TC class, according to Table 2; А — embryonic TC, according to Table 2; Б — number of adjacent TC of the same class; В — indices of TC under regular monitoring since 2012–2013

щимся космическим снимкам и полевым наблюдениям, хотя бы частично обнажается пластовая залежь или повторно-жильные льды. Поверхность чаши термоцирка по большей части лишена растительного покрова, отчетливо дешифрируются следы выноса материала со стенки (эрозионные промоины, конусы выноса на поверхности и в акватории водного объекта, повышенная мутность водного объекта, в который происходит снос материала из термоцирка). Принципиальных различий между зарастающим и заросшим термоцирком в рамках настоящей статьи нет, однако пояснить эти различия необходимо. К заросшим отнесены термоцирки без активной стенки, пластовая залежь бронирована осадочным материалом со стенки, на поверхности

чаши термоцирка отмечается густой растительный покров. При этом растительный покров заметно отличается от окружающей местности, а стенка дешифрируется как лишенная растительного покрова, могут присутствовать лишь пионерные группировки растительности. Зарастающие термоцирки отличаются начальной стадией формирования растительного покрова, для них характерны участки, лишенные какой-либо растительности. Отдельно выделяются эмбриональные термоцирки [14], фактически представляющие собой криогенные оползни течения, в результате которых незначительно обнажились льдистые мерзлые породы или подземные льды и есть предпосылки для дальнейшего вытаивания мерзлых пород или льда.

Изменение количества термоцирков с разной активностью показано на рис. 3. На протяжении всего времени наблюдалось 33 заросших/зарастающих термоцирка. Аномальные климатические условия 2016 г. не привели к массовому увеличению темпов термоденудации по пластовым льдам. Фактически к 2018 г. активизировался только 1 из заросших/зарастающих термоцирков, а общее количество активных сократилось по сравнению с 2013 г. более чем вдвое. Возникновение новых термоцирков в период после 5 июля 2013 г. и затухание процесса их развития к 2018 г. исключается, так как, по дистанционным данным, в 2018 г. в сравнении с 2013 г. абсолютно новых активных или зарастающих объектов не обнаружено.

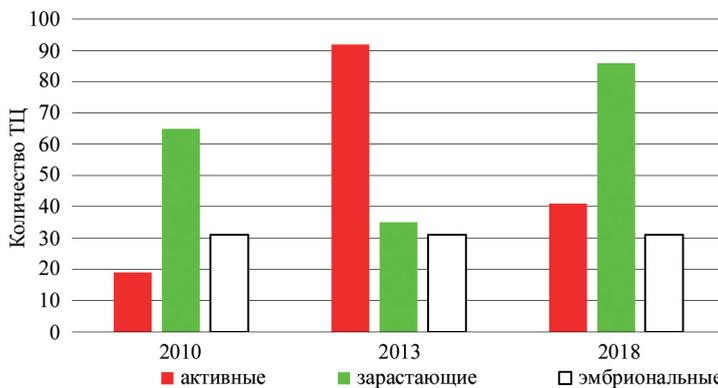


Рис. 3. Количество термоцирков (ТЦ) с разной активностью в 2010, 2013 и 2018 гг.

Fig. 3. Number of thermocirques (TC) with different activity in 2010, 2013 and 2018

Соответственно, за период с 2010 по 2018 г. активность термоденудации повысилась за счет аномальных климатических условий 2012 г., а затем пошла на спад. Примерно 40 % из активизировавшихся термоцирков по состоянию на 2013 г. образовались на месте заросших. Образовалось 43 абсолютно новых на ранее стабильных склонах.

Территориально подавляющая часть всех термоцирков, отмеченных с 2010 по 2018 г., расположена по берегам озер и озерных котловин (102 ТЦ), только 1 термоцирк отмечен на берегу крупной реки, 10 ТЦ — по берегам мелких термокарстовых озерков и 8 ТЦ — не имеют строгой приуроченности к берегам водных объектов. Почти все возникшие в 2013 г. новые термоцирки образовались на ранее стабильных участках берегов озер (70 %) и мелких озерков (25 %). Практически все термоцирки развиваются в естественных условиях, только 5 из них образовались под влиянием техногенной деятельности в коридоре железной дороги после механического нарушения растительного покрова и пород сезонно-талого слоя. Часть таких объектов активизировались непо-

средственно после возведения железной дороги в 2010 г., а часть позднее — к 2013 г. Все «техногенные» термоцирки были рекультивированы во избежание влияния на железную дорогу и фактически перестали существовать. Также на развитие незначительного числа других термоцирков, как, например, ТЦ-4,4а (см. рис. 1в и рис. 2), могли косвенно повлиять многочисленные колеи проезда тяжелой техники, особенно вблизи коридора железной дороги. Однако существенного влияния техногенных факторов на активизацию большинства термоцирков не выявлено.

Весь анализируемый период наблюдался 31 эмбриональный термоцирк (см. табл. 2, рис. 2 и 3). К таким были отнесены небольшие медленно прогрессирующие и незарастающие характерные нарушения высоких берегов озер (42 %) и рек (13 %), а также берегов мелких термокарстовых озерков (45 %). Пример одного из таких термоцирков показан на рис. 4. Согласно полевым наблюдениям, некоторые из таких эмбриональных термоцирков развиваются, что, однако, практически незаметно при сопоставлении имеющихся дистанционных материалов.

Довольно широко распространенные протяженные участки высоких берегов озер и рек, явно развивающиеся под действием термоабразии (рис. 5) или русловых процессов (согласно дешифровочным признакам), не учитывались.

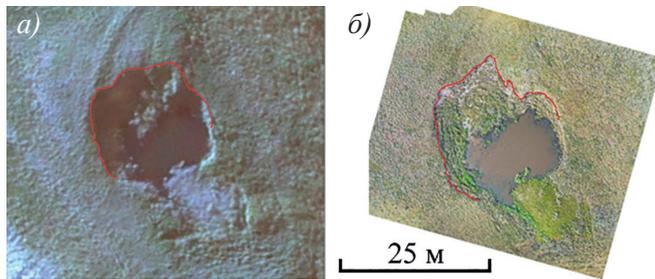


Рис. 4. Пример эмбрионального термоцирка на космическом снимке WorldView-2 за 10 июля 2018 г. (а) и на ортофотоплане на основе БПЛА-съемки за 21 августа 2020 г. (б).

Красной линией показана бровка термоцирка

Fig. 4. Example of an embryonic thermocirque on a WorldView-2 image, date 10.07.2018 (а) and on an orthophotoplan, based on UAV-survey, date 21.08.2020 (б).

The red line is the thermocirque edge

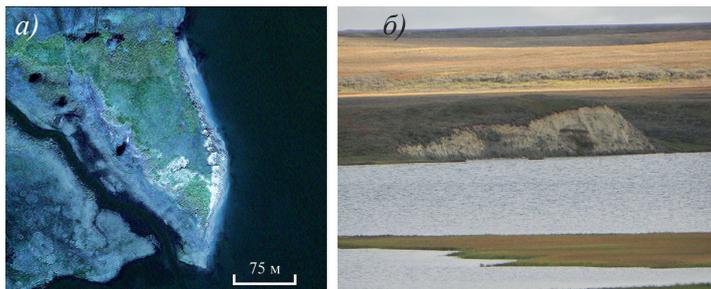


Рис. 5. Примеры термоабразионных уступов на космическом снимке GeoEye-1 за 5 июля 2013 г. (Digital Globe Foundation©) (а) и при полевых наблюдениях (фото А.В. Хомутова, август 2015 г.) (б)

Fig. 5. Examples of thermoabrasion cliffs on GeoEye-1 image, date 05.07.2013 (Digital Globe Foundation©) (а) and by field survey (photo by A. V. Khomutov, August 2015) (б)

## Обсуждение результатов

На современном этапе для разных районов Арктики с подземными льдами, не только для исследуемой территории, характерно увеличение активности процесса термоденудации [24–26].

Формирование большого числа термоцирков в районе исследований именно в 2012 г. не носит случайного характера. Теплый сезон 2012 г. характеризовался ранней весной, индекс оттаивания до даты измерения протаивания более чем в 1,5 раза превысил среднее значение предыдущего почти 20-летнего периода, а летних осадков выпало почти в 2 раза больше. В дальнейшие темпы роста возникших термоденудационных форм рельефа внесли свой вклад достаточно благоприятные климатические условия теплого сезона 2013 г., а различия в этих темпах для разных термоцирков связаны с условиями поверхности, в которых сформировались эти формы рельефа [13]. Повышенное снегонакопление в свежих на тот момент отрицательных формах рельефа, обусловленное в районе исследования ветровым перераспределением [27], способствовало быстрому росту термоцирков под действием термоэрозии, развивающейся в результате таяния снега, накопившегося на стенках термоцирков [28]. Как предполагают некоторые исследователи, увеличение глубины протаивания и температуры пород из-за повышенного снегонакопления [29, 30] может спровоцировать в дальнейшем повторную активизацию процесса после его затухания. В то же время снег сносит поверхностные отложения с днища термоцирка за счет нивации и эрозионных потоков, тем самым одновременно и углубляя термоцирк, и способствуя его затуханию за счет бронирования выноса аккумуляцией отложений. Однако для более точного определения влияния снегонакопления необходимы детальные и длительные натурные наблюдения в период снеготаяния.

Если сравнивать полученные результаты анализа проявления термоденудации на локальном уровне с результатами регионального исследования [31], снимки сверхвысокого пространственного разрешения позволяют выявить почти в 7 раз больше термоденудационных форм рельефа на одной и той же территории, что согласуется с выводом в [32] о наибольшей точности получения результатов параметрического изучения термоденудационных форм рельефа при полевых измерениях или использовании снимков сверхвысокого разрешения. По космическим снимкам сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения в районе исследования было выявлено 158 термоденудационных форм с разной активностью, а при использовании мозаики снимков сервиса Яндекс.Карты [31] с разрешением не выше 15 м — только 23, из которых большая часть (74 %) активные. Соответственно, при проведении подобных региональных [31, 33] и даже циркумполярных исследований [34] необходимо принимать во внимание потерю из анализа значительного числа термоденудационных форм как по причине невозможности их выделения при мелкомасштабном дешифрировании, так и вследствие несовершенства современных открытых мозаик космических снимков, в которых часто используются различающиеся по дате съемки сцены.

Наличие достаточно большого числа эмбриональных термоцирков среди термоденудационных форм рельефа, выявленных по космическим снимкам, говорит о том, что процессы термоденудации развиваются постоянно. Однако, по мнению авторов, отмеченные эмбриональные термоцирки зачастую не развиваются в «классические» по двум основным причинам: 1) возникают на склоне с незначительным уклоном, из-за чего залежь льда сразу бронируется снесенным материалом; 2) возникают за счет вскрытия сезонным протаиванием многолетнемерзлых пород более льдистых,

чем вышележащие. При этом льдистость этих пород недостаточна для развития «классического» термоцирка. В этом случае происходит формирование криогенного оползня течения, но дальнейшего развития процесс термоденудации не получает.

### **Заключение**

За период с 2010 по 2018 г. активность термоденудации в изучаемом районе повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона 2012 г., а затем постепенно пошла на спад. Условия достаточно жаркого лета 2013 г. способствовали высоким темпам вытаивания подземного льда во вновь активизированных и новых термоцирках.

Условия аномально жаркого лета 2016 г. не внесли существенного вклада в активность термоденудационных процессов. Для следующего существенного витка активизации термоденудации в районе исследований необходимо более глубокое протаивание, чем в 2012, 2013 и 2016 гг.

Проведенный для территории ключевого участка «Васькины Дачи» анализ активности термоцирков по использованным данным дистанционного зондирования Земли из космоса показал, что помимо «классических» термоцирков, находящихся в эти три временных среза (2010, 2013, 2018) на разных стадиях активности, выделено существенное количество эмбриональных термоцирков, которые, как и большинство небольших «классических» термоцирков, могут быть выявлены только по космическим снимкам со сверхвысоким пространственным разрешением.

**Конфликт интересов.** Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена Институтом криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012). Данные мониторинга глубины сезонного протаивания (с 1993 по 2018 г.) и термоцирков (с 2012 по 2017 г.) получены в рамках интеграционных проектов СО РАН № 122 и 144. Мониторинг термоцирков в 2018–2020 гг., а также первоначальный этап анализа их активности проведены в рамках гранта РФФИ № 18-05-60222. Экспедиции организованы при поддержке НП «МЭЦ “Арктика”» (2014–2017 гг.) и НП «Российский центр освоения Арктики» (2018–2019 гг.).

**Благодарности.** Авторы признательны сотрудникам ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Е.М. Бабкину и Д.Р. Муллаунову, а также сотрудникам МГУ им. М.В. Ломоносова канд. геогр. наук А.И. Кизякову и Д.Ю. Некрасову за помощь в проведении полевых исследований; компании Digital Globe Foundation за предоставленные данные дистанционного зондирования 2010 и 2013 гг. Отдельная благодарность д-ру геол.-минерал. наук М.О. Лейбман за ценные советы и важные замечания при проведении исследования и подготовке настоящей статьи.

**Competing interests.** Authors declare no conflict of interests.

**Funding.** The research was carried by the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRZ-2021-0012). Datasets of seasonal thaw thickness (1993–2018) and thermocirques (2012–2017) monitoring received within the framework of the integration projects of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 122 and 144. Thermocirques monitoring in 2018–2020 and first stage of their activity analysis was carried within the framework of the RFBR grant No. 18-05-60222. The expeditions were organized by the Interregional Expedition Centre «Arctic» (2014–2017) and The Russian Center of Arctic Exploration (2018–2019).

**Acknowledgments.** The authors are thankful to the researchers of the Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS E.M. Babkin and D.R. Mullanurov, as well as employees of Lomonosov Moscow State University Ph. D. A.I. Kizyakov and D.Yu. Nekrasov for assistance in field research; to the Digital Globe Foundation for providing 2010 and 2013 remote sensing data. Special thanks to the Doctor of Geology and Mineralogy M.O. Leibman for valuable advice and important comments during the research and preparation of this paper.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий Арктических равнин с пластовыми подземными льдами. *Криосфера Земли*. 2006;10(2):79–89.  
Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destructive relief-forming processes on the Arctic Plains with tabular ground ice. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2006;10(2):79–89. (In Russ.)
2. Кизяков А.И., Лейбман М.О. Рельфообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы. *Криосфера Земли*. 2016;20(4):45–58.  
Kizyakov A.I., Leibman M.O. Cryogenic relief-formation processes: a review of 2010–2015 publications. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2016;20(4):45–58.
3. Белова Н.Г. *Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря*. М.: МАКС Пресс; 2014. 180 с.
4. Гусев Е.А. Наблюдения за геоморфологическими процессами на севере Западной Сибири (на примере района Сопочной Карги). *Успехи современного естествознания*. 2011;9:19–22.  
Gusev E.A. Geomorphologic processes observations on the north of West Siberia (Sopochnaya Karga area). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia = Advances in current natural sciences*. 2011;9:19–22. (In Russ.)
5. Куницкий В.В., Сыромьятников И.И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н. Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь). *Криосфера Земли*. 2013;17(1):56–68.  
Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Schirrmeister L., Skachkov Yu.B., Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M.N. Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana Upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(1): 56–68. (In Russ.)
6. 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.)
7. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction. *The Cryosphere*. 2015;9(1):151–178. <https://doi.org/10.5194/tc-9-151-2015>
8. Lantuit H., Pollard W.H., Couture N., Fritz M., Schirrmeister L., Meyer H., Hubberten H.-W. Modern and late Holocene retrogressive thaw slump activity on the Yukon coastal plain and Herschel Island, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012;23(1):39–51. <https://doi.org/10.1002/ppp.1731>
9. 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%2D9326/11/3/034025>
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. Губарьков А.А., Лейбман М.О. Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале — результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов. *Криосфера Земли*. 2010;14(1):41–49.  
Gubar'kov A.A., Leibman M.O. Bead-shaped channel forms as evidence of paragenesis of cryogenic and hydrological processes in the small-river valleys of Central Yamal. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2010;14(1):41–49. (In Russ.)

12. Кизьяков А.И., Зимин М.В., Лейбман М.О., Правикова Н.В. Мониторинг скорости термоденудации и термоабразии на западном побережье острова Колгуев с использованием материалов космической съемки высокого разрешения. *Криосфера Земли*. 2013;17(4):36–47. Kizyakov A.I., Zimin M.V., Leibman M.O., Pravikova N.V. Monitoring of the rate of thermal denudation and thermal abrasion on the western coast of Kolguev Island, using high resolution satellite images. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(4):36–47. (In Russ.)
13. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_24)
14. Лейбман М.О., Кизьяков А.И. *Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова*. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.
15. Dupeyrat L., Costard F., Randriamazaoro R., Gailhardis E., Gautier E., Fedorov A. Effects of ice content on the thermal erosion of permafrost: implications for coastal and fluvial erosion. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011;22(2):179–187. <https://doi.org/10.1002/ppp.722>
16. Ulrich M., Grosse G., Strauss J., Schirmer L. Quantifying wedge-ice volumes in yedoma and thermokarst basin deposits. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2014;25(3):151–161. <https://doi.org/10.1002/ppp.1810>
17. 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>
18. Хомутов А.В., Лейбман М.О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова. *Криосфера Земли*. 2008;12(4):24–35.  
Khomutov A.V., Leibman M.O. Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky Peninsula coast. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2008;12(4):24–35. (In Russ.)
19. Lantz T.C., Kokelj S.V. Increasing rates of retrogressive thaw slump activity in the Mackenzie Delta region, N.W.T., Canada. *Geophysical Research Letters*. 2008;35(6):L06502. <https://doi.org/10.1029/2007GL032433>
20. Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины Дачи» на Центральном Ямале: 30 лет исследований. *Криосфера Земли*. 2019;23(1):91–95. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(91-95\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95))  
Leibman M.O., Khomutov A.V. Research station “Vaskiny Dachi” at Central Yamal: 30 years of study. *Earth's Cryosphere*. 2019;23(1):78–82. [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-1\(78-82\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2019-1(78-82))
21. Leibman M.O. Preliminary results of cryogenic landslides study on Yamal Peninsula, Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1995;6(3):259–264. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430060307>
22. Leibman M.O., Khomutov A.V., Kizyakov A.I. Cryogenic landslides in the West-Siberian plain of Russia: classification, mechanisms and landforms. In: Shan W. et al. (eds.). *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering*. Springer International Publishing AG; 2014. P. 143–162. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00867-7_11).
23. *Специализированные массивы для климатических исследований*. 2000–2011–2018–2022. URL: <http://aisori-m.meteo.ru> (дата обращения 24.11.2022)

24. Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н. Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. *Арктика и Антарктика*. 2021;(4):32–46. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>  
Maslakov A.A., Kusyakin L.P., Komova N.N. Dynamics of thermocirque, enclosing tabular ground ice, near the settlement Lavrentiy (Chukotsky Autonomous Okrug) in 2018–2021. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2021;(4):32–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
25. Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y., Sonyushkin A., Zimin M. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, update since 2001–2010. *Remote Sensing*. 2021;13(20):4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>
26. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment. *Nature Communications*. 2019;10(1):1329. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>
27. Дворников Ю.А., Хомутов А.В., Муллануров Д.Р., Ермохина К.А. Моделирование распределения водного эквивалента снежного покрова в тундре с использованием ГИС и данных полевой снегомерной съемки. *Лед и снег*. 2015;55(2):69–80. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-69-80>  
Dvornikov Y.A., Khomutov A.V., Mullanurov D.R., Ermokhina K.A. GIS- and field data based modeling of snow water equivalent in shrub tundra. *Led i sneg = Ice and Snow*. 2015;55(2):69–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-2-69-80>
28. Губарьков А.А., Лейбман М.О., Мельников В.П., Хомутов А.В. Вклад термоэрозии и термоденудации в отступление берегов Югорского полуострова. *Доклады Академии наук*. 2008;423(4):543–545.  
Gubar'kov A.A., Leibman M.O., Mel'nikov V.P., Khomutov A.V. Contribution of lateral thermoerosion and thermal denudation to coastal retreat of the Yugorskii Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2008;423(2):1452–1454. <https://doi.org/10.1134/S1028334X08090286>
29. Lantz T.C., Kokelj S.V., Gergel S.E., Henry R. Relative impacts of disturbance and temperature: persistent changes in microenvironment and vegetation in retrogressive thaw slumps. *Global Change Biology*. 2009;15(7):1664–1675. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01917.x>
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. 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>
32. Лейбман М.О., Кизьяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023;69(4):486–500. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>  
Leibman M.O., Kizyakov A.I., Nesterova N.B., Tarasevich I.I. Classification of cryogenic-landslide landforms for mapping and prediction. *Arctic and Antarctic Research*. 2023;69(4):486–500. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>
33. Leibman M., Nesterova N., Altukhov M. Distribution and morphometry of thermocirques in the North of West Siberia, Russia. *Geosciences*. 2023;13(6):167. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060167>
34. Huang L., Willis M.J., Guiye L., Lantz T.C., Schaefer K., Wig E., Cao G., Tiampo K.F. Identifying active retrogressive thaw slumps from ArcticDEM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023;205:301–316. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.10.008>