

ДИНАМИКА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ КРИОГЕННЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ (2007—2023 ГГ.)

О. С. Сизов¹, М. А. Миронова²

¹ Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

² Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 15 января 2025 г.

Для цитирования

Сизов О. С., Миронова М. А. Динамика, распространение и климатические условия развития криогенных оползней в западной части полуострова Ямал (2007—2023 гг.) // Арктика: экология и экономика. — 2025. — Т. 15, № 2. — С. 177—190. — DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-177-190.

На основе данных дистанционного зондирования Земли определены динамика и пространственное распространение криогенных оползней в западной части полуострова Ямал. Дана детальная характеристика климатических условий развития оползневых процессов в данном регионе за последние 55 лет. Разработан комплексный показатель опасности развития термоденудации, учитывающий длительность периода активных температур и сумму осадков в теплый период года. Предложен подход по прогнозированию экстремальных оползневых процессов на основе учета метеонаблюдений, морфометрических параметров рельефа и особенностей пространственного распространения залежей пластового льда.

Ключевые слова: Ямал, криогенный оползень, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), многолетняя мерзлота, пластовый лед, изменение климата.

Введение

Термоденудация — один из основных процессов, формирующих современный рельеф криолитозоны Арктики [1]. Активизация термоденудации на современном этапе связана с изменением теплового баланса в высоких широтах и развитием механической эрозии в прибрежной зоне озерных и морских акваторий [2—6]. Одним из наиболее опасных для инженерных сооружений проявлений термоденудации считается образование криогенных оползневых форм рельефа (КОФР) [13], основным триггером развития которых выступает вытаивание залежей пластовых льдов [1; 7; 8].

В типовом строении КОФР выделяют тыловую стенку отрыва, поверхность скольжения и язык оползня (оползневое тело, состоящее из переувлажненного грунта) [9—12]. По глубине залегания залежеобразующих подземных льдов и степени сохранности оползневого тела КОФР на верхнем уровне классификации делят на криогенные ополз-

ни скольжения (КОС) и криогенные оползни течения [1; 13].

Многочисленные публикации [7; 8; 14—16] показывают, что наибольшая активность оползневых процессов на примере полуострова Ямал наблюдается лишь в отдельные теплые и влажные летние сезоны, когда происходит значительное (до 10—15%) отклонение от климатической нормы. Однако результаты целенаправленных исследований [7; 16] не выявили прямую зависимость появления новых КОФР от повышения температуры воздуха или от увеличения глубины сезонно-талого слоя (СТС). Наиболее показательным является феноменально теплое лето 2016 г.: резкое увеличение глубины протаивания (на 24—37% от среднего уровня 1993—2011 гг.) не привело к возникновению большого числа новых криогенных оползней или эмбриональных термоцирков [7; 16].

По всей видимости, существуют дополнительные причины активизации оползневых процессов, одной из которых предположительно может являться прямое антропогенное воздействие на участки поверх-

ности, характеризующиеся низкой степенью устойчивости грунтов. Вероятность этого допущения усиливает относительно высокая антропогенная нагрузка на территорию Ямала в связи с масштабным развитием инфраструктуры по добыче и транспортировке углеводородов. Тем не менее существенное влияние техногенных факторов на динамику КОФР до настоящего времени не отмечено [7].

Активизация криогенного оползания в Арктике в последние годы вызвала повышенный интерес к картографированию КОФР на основе материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2; 5; 13; 17—21], в том числе с помощью нейронных сетей [22—24]. В частности, в [19; 20; 25] рассматривается динамика прибрежных термоцирков (берега морей и озер), однако ограничения пространственной выборки не позволили авторам получить однозначные выводы относительно закономерностей развития термоденудации на склонах различной экспозиции. В отдельных случаях фактической основой дистанционных исследований являются снимки среднего разрешения Sentinel-2 (10 м), что приводит к увеличению значения нижнего порога площади выявляемых объектов до 0,55 га [21]. Подобный подход не позволяет учесть большую часть термоцирков, существенно искажая картину пространственного распространения и реальных средних размеров КОФР. В то же время привлечение снимков сверхвысокого разрешения (менее 1 м) увеличивает количество выявляемых термоденудационных форм почти в семь раз (на примере отдельных тестовых участков) [7]. Стоит отметить, что временной интервал дистанционного мониторинга на Ямале зачастую включает только один эпизод термоденудационной активизации 2012 г., а для дешифрирования используются преимущественно мозаики отрывных картографических сервисов без дополнительной спектральной информации [20; 25]. При этом анализ распределения термоцирков по геоморфологическим уровням (III, IV) не учитывает существующие в актуальной научной литературе концепции формирования и развития рельефа территории полуострова Ямал в позднем неоплейстоцене [25].

Таким образом, целью данной работы является анализ динамики, оценка распространения и выявление ведущих климатических условий образования КОФР в западной части полуострова Ямал с использованием данных ДЗЗ сверхвысокого разрешения.

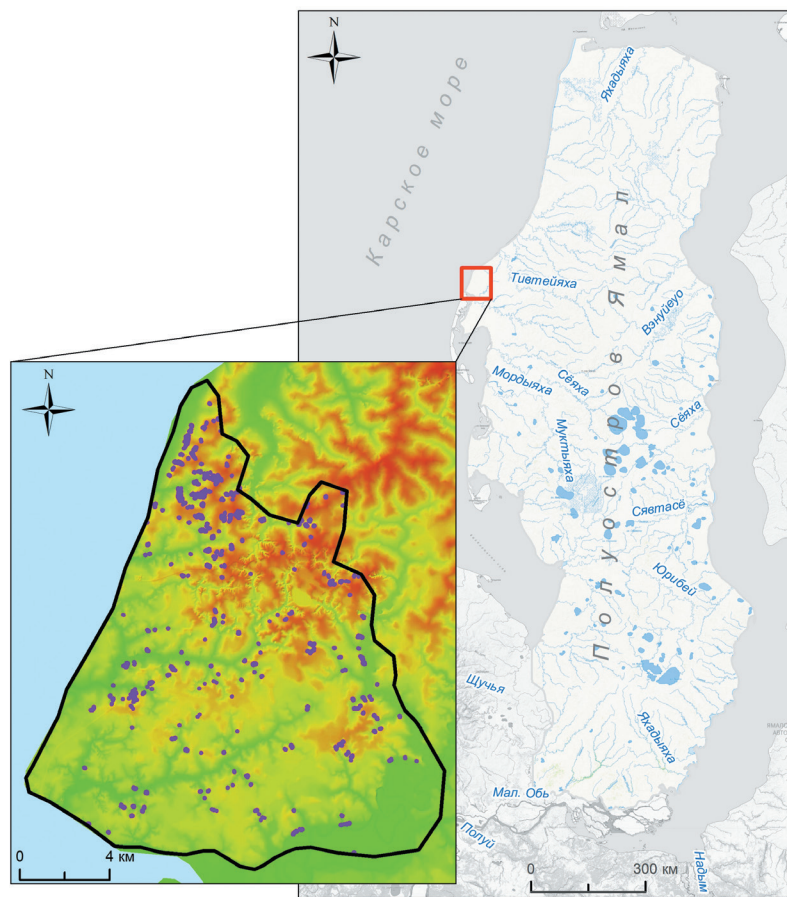


Рис. 1. Обзорная карта расположения района работ (фиолетовым цветом показаны выявленные КОФР за 2007–2023 гг.)

Fig. 1. Overview location map of the work area (identified retrogressive thaw slumps – RTSs for 2007–2023 are shown in purple)

Район исследований

Район проведения исследования площадью около 400 км² расположен в западной прибрежной части полуострова Ямал между мысом Бурунный и устьем реки Сильяха (рис. 1). Территория представляет собой пологонаклонную, слабо всхолмленную в водораздельной части, изрезанную долинами рек и ручьев равнину с относительно небольшим количеством озер. Абсолютные отметки рельефа изменяются от 0 м на побережье Карского моря до 30 м на водоразделах (здесь и далее используется Балтийская система высот). Глубина вреза оврагов достигает 15–20 м, в вершинах многих оврагов наблюдаются циркообразные расширения, заполненные снежниками, таяние которых обеспечивает питание временных водотоков и способствует активному развитию линейной эрозии.

В климатическом отношении территория характеризуется суровой продолжительной зимой (до 9,5 мес) и крайне коротким прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха изменяется от –2,5°C до –11,1°C (за 1914–2023 гг.), составляя в среднем –7,6°C. Температурный режим в летний период определяется циркуляцией воздушных масс, поступающих с севера и северо-запада. Периодиче-

Таблица 1. Характеристика космических снимков

Table 1. Characteristics of satellite images

Спутник	ID снимка	Дата съемки	Разрешение	Источник
WorldView-02	10300100193F7500	2012.06.26	0,52	DigitalGlobe GDBX
WorldView-01	102001001AB3AB00	2012.08.07	0,53	То же
Ikonos-2	10600100084B3B00	2013.08.11	0,8	NASA CSDA
WorldView-02	1030010028702800	2013.10.02	0,52	DigitalGlobe GDBX
GeoEye-01	105041001105F800	2014.07.18	0,54	То же
WorldView-02	1030010046270600	2015.07.27	0,53	«
WorldView-02	103001004780B100	2015.08.04	0,57	«
WorldView-02	10300100ED6DD300	2023.09.04	0,60	NASA CSDA
WorldView-01	10200100F0902500	2024.07.25	0,54	То же

ские вторжения теплого воздуха с юга могут приводить к краткосрочным повышению температуры воздуха до 25—30°C. Наибольшее количество атмосферных осадков выпадает летом (до 200 мм). Снежный покров устанавливается в октябре и сохраняется в среднем в течение 250 дней в году.

Максимальная глубина протаивания грунтов формируется к началу сентября. Суглинистые грунты в среднем протаивают на 0,3—0,8 м, песчаные — на 0,4—1,0 м, торфяные — на 0,3—0,5 м [26]. При уничтожении растительного покрова и торфянистого слоя глубина протаивания песков увеличивается на 0,5—1,2 м, на суглинистых грунтах увеличение мощности СТС в этом случае не превышает 0,1—0,4 м [26]. Среднегодовая температура ММП в районе Харасавэя увеличилась с –7,0°C (1980 г.) до –5,2°C (2018 г.), при этом мерзлота остается устойчивой как на высоких, так и на низких поверхностях [27].

Отличительными чертами мерзлых грунтов являются широкое распространение крупных скоплений подземного залежеобразующего льда в верхних горизонтах и их высокая насыщенность сегрегационным льдом. Кровля пластовых льдов по данным инженерно-геологических изысканий вскрывается на глубинах от 0,4 до 14,5 м, их мощность составляет от 0,2 до 15,9 м, лед преимущественно прозрачный, белый или серовато-белый без примесей и включений. Сингенетические повторно-жильные льды вертикальной мощностью в среднем 2—4 м приурочены ко всем литологическим разностям пород различного генезиса, размеры полигонов составляют от 20 до 60 м в поперечнике [14; 26]. Объемная макрольдистость в сильнольдистых суглинках и супесях составляет 6—10%, в песках — 3—8% [26]. Увеличение мощности СТС активизирует процессы эмиссии биогенного метана, которые способны усилить степень теплового воздействия и снизить устойчивость склонов в период положительных температур [28].

Район работ в настоящее время характеризуется активным хозяйственным освоением в связи с обу-

стройством крупного месторождения газа и конденсата. Потенциальная залежь углеводородов здесь обнаружена в 1972 г. по данным сейсморазведочных работ, активное поисковое бурение выполнено в 1980-х годах, однако строительные работы начались только в 2020 г., а начало эксплуатации планируется в конце 2025 г.

Исходные данные и методы исследований

Первичной фактической основой работ являются результаты проведенных ранее исследований, в рамках которых выполнено обобщение материалов инженерно-геологических изысканий 2008—2013 гг., а также подготовлена база данных архивных аэрофото- и космических снимков территории за 2007 и 2012—2014 гг. [29]. Систематизация разнородных данных позволила получить детальные сведения о составе и криогенном строении многолетнемерзлых грунтов на участках развития опасных экзогенных процессов, а наземные маршруты обследования наиболее репрезентативных объектов стали достоверным источником информации о ключевых индикаторных признаках криогенных оползней, используемых при дальнейшем дешифрировании.

Для актуализации и уточнения сведений о динамике КОФР использовались данные ДЗЗ со сверхвысоким (менее 1 м) разрешением (табл. 1), поскольку они обеспечивают наиболее точные результаты дешифрирования [13; 30].

Дешифрирование осуществлялось визуальным методом на основе совокупности характерных геометрических, спектральных и текстурных признаков активных криогенных оползней, как наиболее достоверно выделяемых КОФР [13]. Выделялись стенка отрыва, участок оголенного ложа и оползневое тело, выходящее на ненарушенную поверхность или в водный поток [13]. Для улучшения визуальных свойств исходных изображений использовались фильтры, повышающие резкость, различные варианты синтеза мультиспектральных каналов, а также

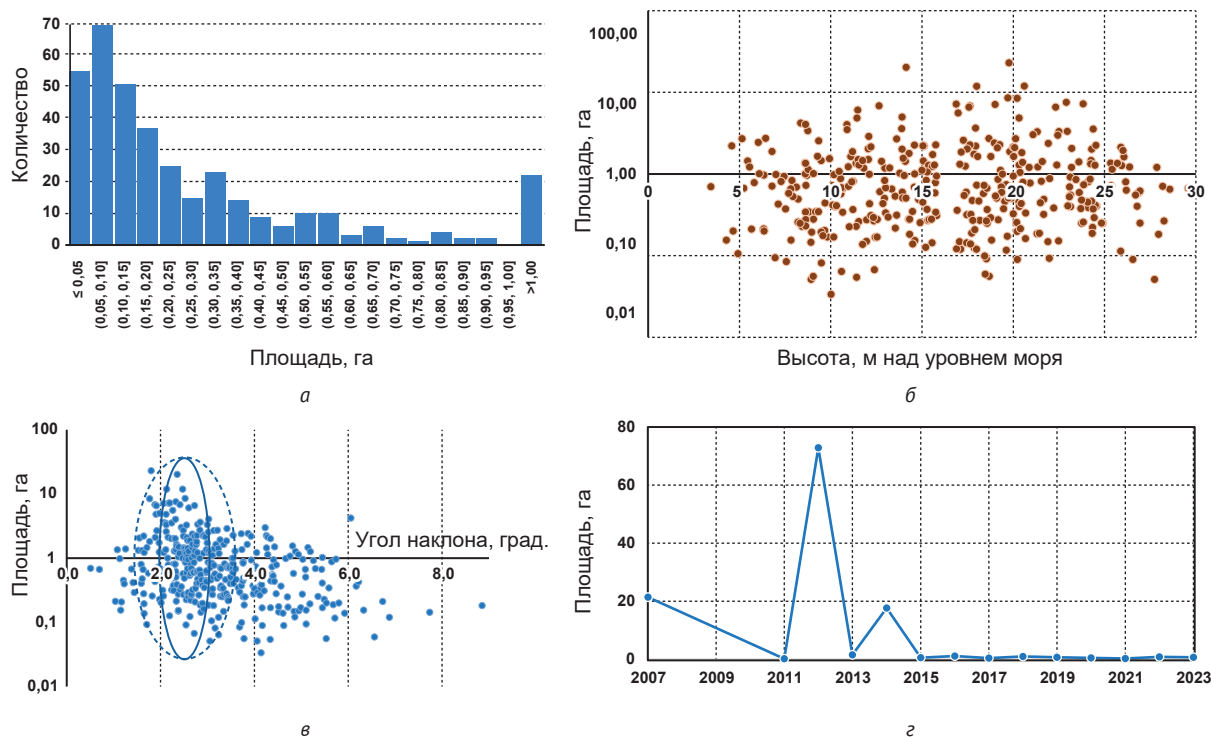


Рис. 2. Распределение выявленных КОФР по: площади (а), абсолютной высоте (б), углам наклона исходной поверхности (в) и динамике появления активных КОФР в пределах района исследований (г)
Fig. 2. Distribution of identified RTs by: area (а), absolute height (б), slope angles (в) and dynamics of the appearance of active RTs within the study area (г)

подстройка гистограммы под видимый экстенд. Выбор визуального метода дешифрирования обусловлен тем, что современные автоматические способы (сегментация, нейронные сети) не обеспечивают высокую (более 0,95) точность результатов, требуя при этом значительного времени и вычислительных ресурсов на подготовку моделей глубокого обучения [31; 32].

Дополнительно использовались следующие данные ДЗЗ:

- высокого разрешения Corona (КН-2/4а/9; 3—7 м) — для ретроспективного анализа территории до начала хозяйственного освоения (1961, 1969, 1976 гг.) [33];
- среднего разрешения Landsat (30 м) и Sentinel-2 (10 м) — для установления времени появления криогенных оползней среднего и крупного размеров и обзорного картографирования (1987—1991, 2011—2023 гг.) [34; 35];
- низкого разрешения Terra/MODIS (1000 м) — для оценки температуры поверхности в пределах полуострова Ямал (2001—2024 гг.; 8-дневный композит MOD11A2.061 [36], обработка выполнялась с помощью Google Earth Engine);
- цифровая модель ArcticDEM (2 м) — для расчетов морфометрических показателей рельефа (углы наклона, кривизна, экспозиция и др.), значения высот приведены к Балтийской системе на основе топоосновы 1:100 000 [37].

Все перечисленные данные ДЗЗ находятся в открытом доступе и распространяются через порталы операторов соответствующих съемочных систем и архивов [33—37].

Для анализа климатических условий использовались результаты метеонаблюдений ближайшей станции Марресале (с 1966 по 2021 гг., данные о температуре, осадках, облачности и др.). Данные получены с помощью информационной системы АИСОРИ [38].

Картографические работы и дешифрирование данных ДЗЗ выполнялись с использованием ГИС-программ QGIS 3.40 и ArcGIS Desktop 10.8, статистическая обработка и построение графиков проведены с помощью MS Excel 2019.

Результаты исследований

Всего на территории исследований выявлено 367 КОФР с признаками активизации с 2007 по 2023 гг. общей площадью 119,3 га. Средняя площадь объекта составила 0,32 га, максимальная — 5,79 га, минимальная — 0,01 га. Почти половину выборки составляют объекты площадью до 0,15 га (48%), количество крупных оползней (более 1 га) не превышает 6% (рис. 2а). Среднее значение периметра объектов составило 246 м, максимальное — 1588 м, минимальное — 35 м.

Высотное распределение выявленных объектов довольно равномерное, без явно выраженных пи-

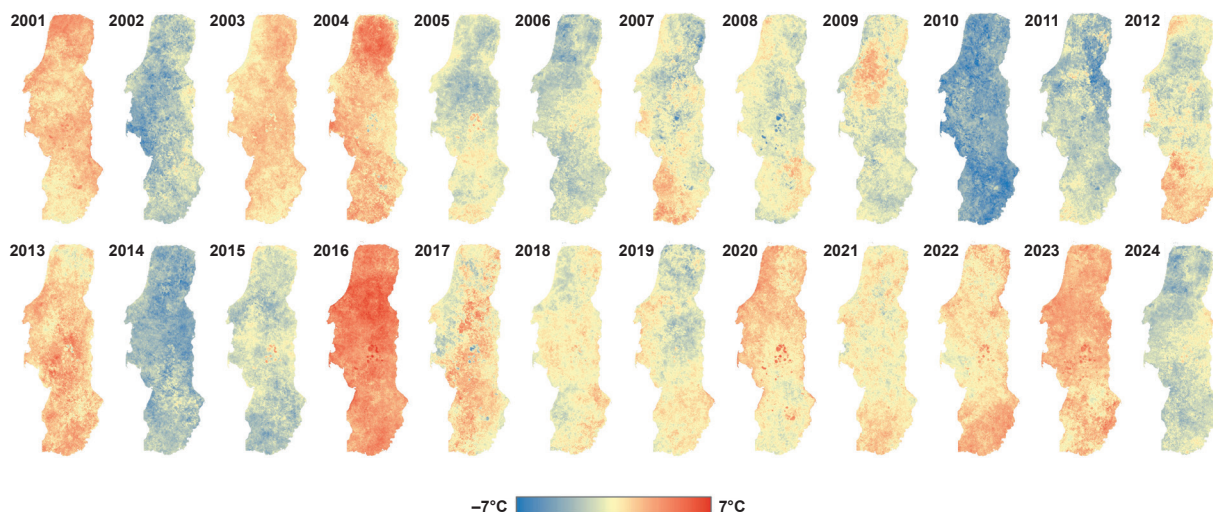


Рис. 3. Отклонение средней температуры поверхности (LST по данным Terra/MODIS) за летний период (июнь–август) в пределах полуострова Ямал от среднего многолетнего значения за 2001–2024 гг.

Fig. 3. Deviation of mean surface temperature (LST according to Terra/MODIS data) for the summer period (June–August) within the Yamal Peninsula from the long-term average value for 2001–2024

ков — 90% КОФР образовались в интервале высот от 7 до 25 м над уровнем моря (см. рис. 2б). Более закономерной выглядит приуроченность к склонам различной крутизны, демонстрирующая распределение, близкое к нормальному. Около половины КОФР (54% по площади и 40% по количеству) возникли на полого наклонной поверхности в узком интервале углов от 2,0° до 3,0° (см. рис. 2в). В интервале от 1,5° до 3,5° выявлено 82% площади криогенного оползания. С увеличением и уменьшением крутизны склонов наблюдается заметное снижение средней и суммарной площадей КОФР. В прибрежной зоне Карского моря заметного развития криогенного оползания за рассматриваемый период не выявлено.

Большая часть активных КОФР образовалась в 2012 г. (61% площади), к 2007 и 2014 гг. отнесено 18% и 15% объектов соответственно (см. рис. 2г). Стоит отметить, что для нескольких объектов 2014 г. не доступны более ранние высокдетальные снимки, поэтому некоторая их часть также может относиться к 2012 г. В остальные годы прирост площадей криогенного оползания не превышал 1,2% (в среднем 0,6% — от 1 до 6 объектов в год).

Анализ архива Landsat-7 показал, что наиболее крупные криогенные оползни сошли не позднее 25 августа 2012 г., при этом на частично облачном снимке от 7 августа 2012 г. некоторые оползневые участки не прослеживаются. Таким образом, наиболее вероятным периодом оползневой активности является вторая половина августа 2012 г.

Строительные работы по обустройству месторождения, ведущиеся с 2020 г. до настоящего времени, практически не отразились на активизации криогенных оползней. В буферной зоне до 100 м от песчаного основания строящихся промышленных

объектов с 2020 по 2023 гг. фактически выявлен только один новый оползень (и то лишь частично) площадью 0,074 га. Несколько существующих КОФР 2012–2014 гг., оказавшихся в зоне строительства, заметных признаков активности также не проявили.

Вполне очевидно, что наиболее вероятные причины экстремального развития оползневых процессов в 2012 г. связаны с определенным сочетанием климатических условий, среди которых могут быть температура летнего периода, температура предшествовавшего зимнего периода, величина осадков в летний период, величина осадков в предшествовавший зимний период, освещенность в летний период. Обработка метеонаблюдений (1966–2021 гг.) и результатов дистанционных измерений (2001–2024 гг.) показала следующую картину для 2012 г. (рис. 3 и 4):

- средняя температура в летний период по результатам дистанционных измерений с помощью сенсора MODIS оказалась на 1,4% ниже среднего значения за последние 24 года, притом что в 2016 г. превышение достигало 22%;
- средняя температура в летний период по данным метеонаблюдений на 58% выше среднего значения, при этом в 2016 и 2020 гг. значения выше на 101% и 60% соответственно;
- температура в предшествовавший зимний период на 34% выше среднего значения, что является достаточно высоким, но не уникальным показателем — в 2020 г. превышение составило 36%, значительные отклонения выявлены также в 1995, 2016 и 2020 гг.;
- суммарные осадки в летний период оказались на 78% выше среднего, однако в 2010, 2018 и 2021 гг. превышения достигали 55%, а по коли-

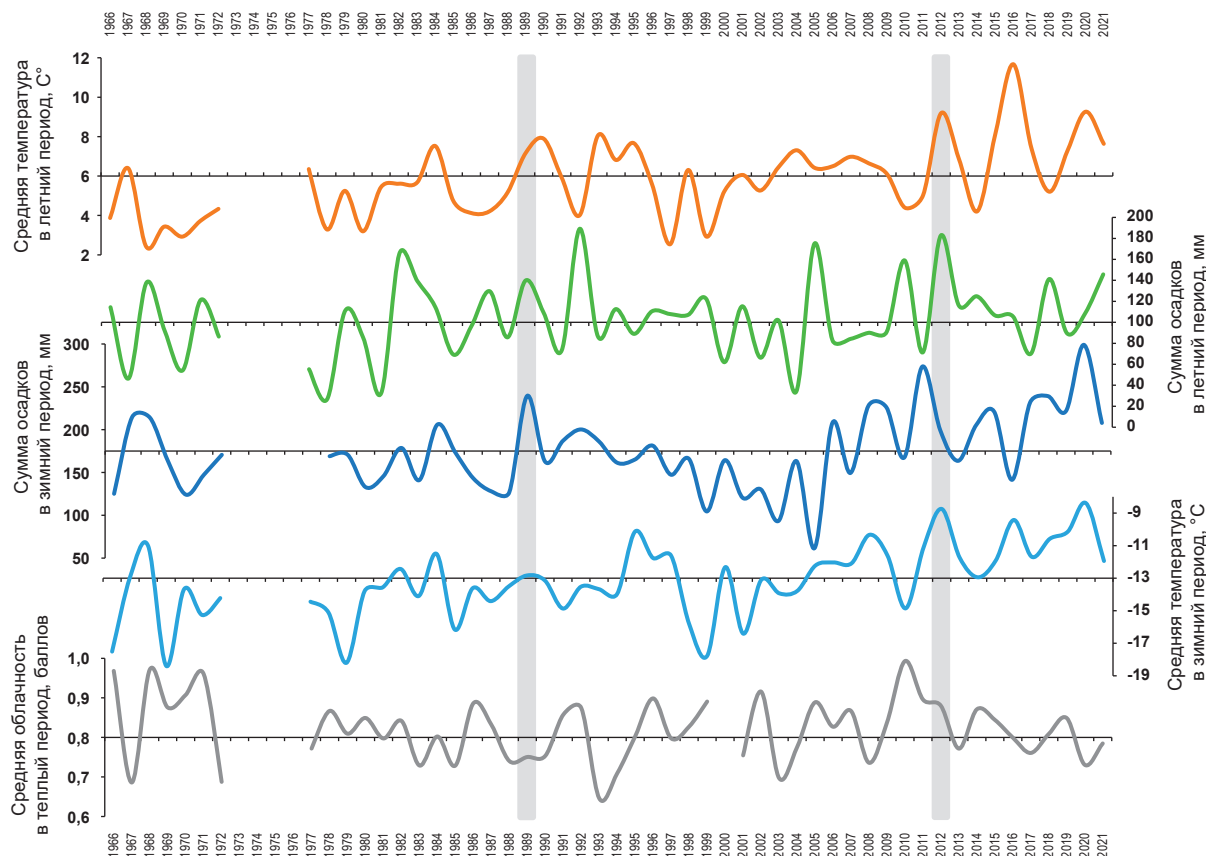


Рис. 4. Динамика метеорологических параметров по данным метеостанции Марресале, 1966–2021 гг. (серым цветом выделены периоды активизации КОФР)

Fig. 4. Dynamics of meteorological parameters according to the Marresale weather station records, 1966–2021 (periods of RTSS' activation are highlighted in gray)

честву сильных дождей (однократное выпадение более 3 мм осадков) превышение в 2012 г. составило всего 36%, в то время как в 2016, 2017 и 2021 гг. число обильных дождей было на 67–76% больше среднего;

- осадки в предшествующий зимний период на 14% выше среднего, при этом в 1989, 2011 и 2020 гг. значения существенно выше;
- освещенность (доля облачности) в летний период на 7% выше среднего, при этом в 1993, 2003, 2008, 2013, 2017 и 2020 гг. превышения достигли 21%.

Приведенные данные показывают, что практически все показатели 2012 г. превышают средние значения. Тем не менее они не являются уникальными в общем ряду наблюдений — по каждому показателю за исключением суммарных осадков в летний период выделяются годы с более существенными превышениями среднего. В этом отношении стоит отметить аномально теплые и влажные летние сезоны 2016 и 2020 гг., которые не характеризуются заметным приростом площадей криогенного оползания.

Единственным кардинальным отличием теплого сезона 2012 г., отмеченным в литературе [7], является раннее наступление весны, которое наглядно

характеризуется очищением ото льда залива Шар-пов Шар и практически всего западного побережья полуострова Ямал. Весна 2012 г. оказалась более ярко выраженной даже по сравнению с теплыми 2016 и 2020 гг. Ранний приход тепла отразился, в частности, в том, что сумма положительных температур (индекс оттаивания) на Ямале более чем в полтора раза превысил средние значения за предыдущие почти 20 лет [7].

Можно предположить, что именно кумулятивный эффект накопления тепла и влаги играет ключевую роль в развитии КОФР (является необходимым или обязательным условием). Предлагаем формализацию этого предположения в виде климатического показателя опасности развития термоденудации (КПОРТ):

$$\text{КПОРТ} = \frac{\sum(TP)}{10^5},$$

где T — среднесуточная температура воздуха, °C; P — суточная сумма осадков, мм.

КПОРТ целесообразно рассчитывать от начала теплого периода (переход среднесуточной темпера-

туры воздуха через 0°), на примере западной части Ямала (метеостанция Марресале) расчеты выполнены с 1 июня (рис. 5).

Полученные результаты (рис. 5а) наглядно показывают, что в интервале с 2001 по 2021 гг. именно в летний период 2012 г. происходит последовательное увеличение КПОРТ, значение которого (1,73) к 31 августа на 136% превышает среднее значение за 21 год (0,73) и на 40% и 60% превышает значение более теплых 2016 г. (1,24) и 2020 г. (1,07) соответственно. Аномально раннее повышение КПОРТ заметно уже 20 июля, с переходом в критическую зону (более 1) приблизительно 6 августа и с дальнейшим быстрым повышением вплоть до конца августа.

Обсуждение результатов

Климатическая аномалия 2012 г., по всей видимости, имела общий для всей Арктики характер, что в частности подтверждается:

- минимальной площадью морского льда в Северном Ледовитом океане за 1979–2024 гг. (на 40% меньше среднего значения) [39];
- максимальными значениями температуры поверхности (MODIS LST) и интенсивности таяния ледникового щита Гренландии (GrIS) за 2000–2020 гг. [40];
- максимальным значением температуры воды Карского моря за 1978–2017 гг. [41].

С повышением температуры воздуха летом 2012 г. также связывают аномальное увеличение глубины СТС, высокие темпы вытаивания подземного льда, а также активный рост существующих и появление новых (в том числе «особо крупных») термоцирков в центральной части полуострова Ямал (район научного стационара «Васькины Дачи») [7; 16; 20; 25]. По результатам детального дешифрирования с 2009 по 2018 гг. общая площадь термоцирков здесь увеличилась на 236%, при этом их средняя площадь стала на 65% больше (0,53 га), а крутизна склонов исходной поверхности выше (3–5°) [25].

Важно отметить, что локализация основной доли КОФР 2012 г. в северо-западной части рас-

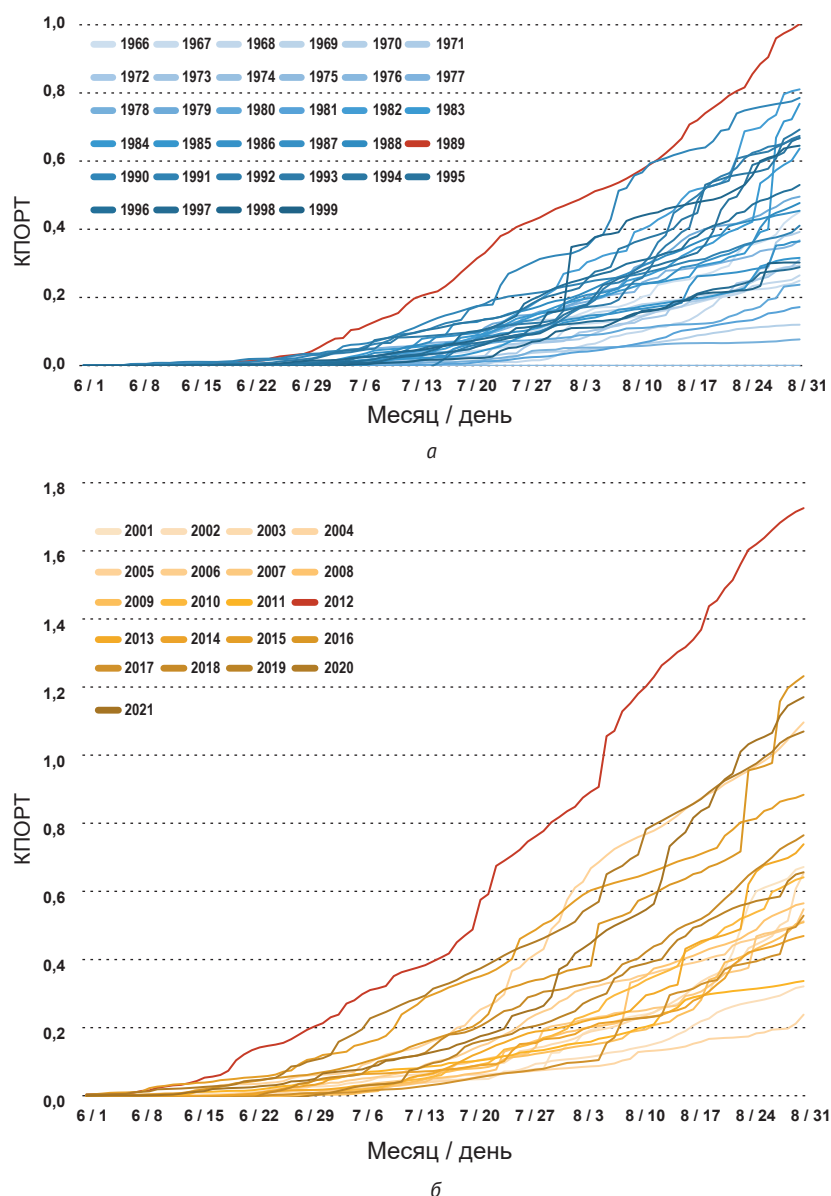


Рис. 5. Динамика КПОРТ по данным метеостанции Марресале: с 2001 по 2021 гг. (а), с 1966 по 1999 гг. (б) (летний период – с 1 июня по 31 августа)

Fig. 5. KPORT or TDRCI (climatic index of the thermodenudation development risk) dynamics according to the Marresale weather station from: 2001 to 2021 (a), 1966 to 1999 (b) (summer period – from June 1 to August 31)

сматриваемой территории (вблизи мыса Бурунный) пространственно соотносится с широким коридором проездов вездеходной техники от побережья до ближайшей площадки разведочной скважины (рис. 6). Следы активного передвижения отмечаются как минимум с 2010 г., проезды могли быть связаны с разработкой песка для строительных работ на побережье или вывозом металлолома с буровой. В любом случае длительное вибрационное воздействие движущейся тяжелой техники (особенно в теплый период) не могло не вызвать микродеформации исходной мерзлой структуры грунтовой толщи в буферной зоне до 1–2 км [42–44].

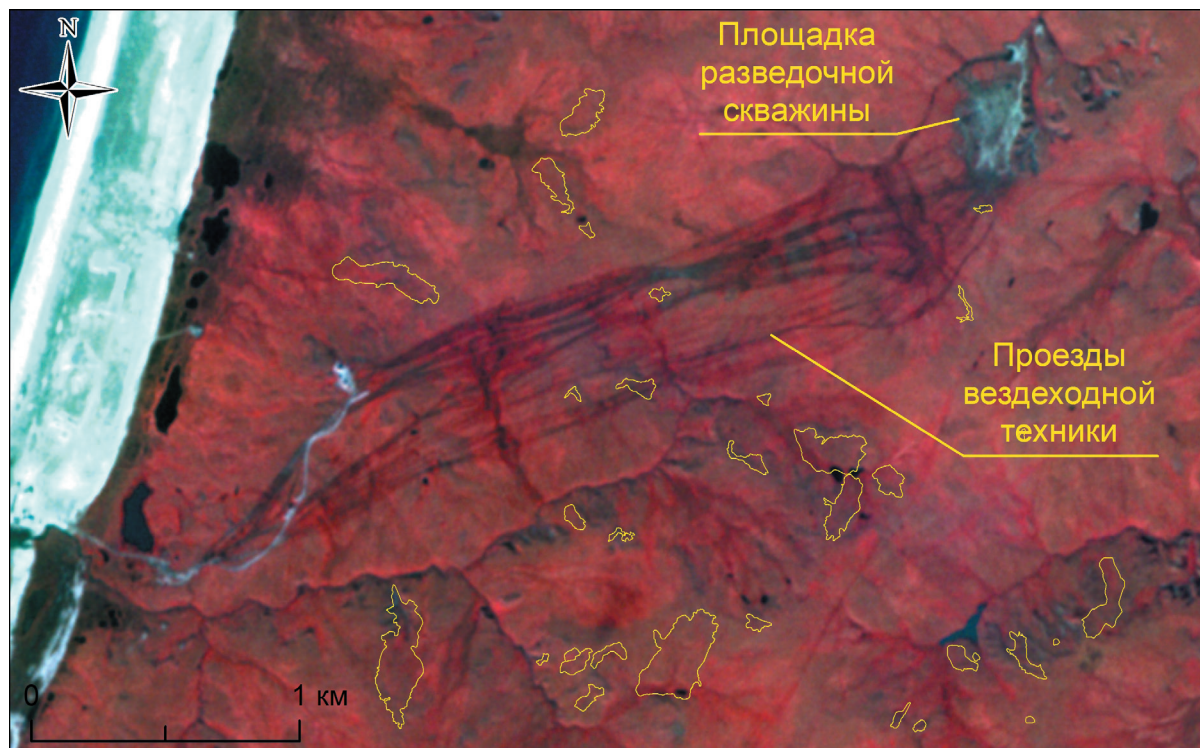


Рис. 6. Проезды вездеходной техники в северо-западной части района исследований (снимок RapidEye, 05.09.2011), границы криогенных оползней 2012 г. показаны желтым цветом
Fig. 6. All-terrain vehicle passes in the northwestern part of the study area (RapidEye satellite image, 05.09.2011), the boundaries of retrogressive thaw slumps in 2012 are shown in yellow

Ситуацию 2012 г. наиболее логично сравнить с событиями конца лета 1989 г., когда в центральной части Ямала был зарегистрирован масштабный сход криогенных оползней (15—18 и 27—30 августа), в результате чего на несколько лет обширные участки поверхности оказались полностью оголены [8; 45]. Оползни возникли в верхних, средних и нижних частях склонов различной крутизны и экспозиции [15].

Обзорное картографирование на основе данных Landsat-5 (классификация мультивременного композита за 1988 и 1990 гг. методом максимального правдоподобия) показало, что оползневые процессами было затронуто не менее 1,14% территории (рис. 7а), что в целом совпадает с имеющимися оценками («до 2% суммарной поверхности склонов» по данным [8]). Оползни действительно приурочены преимущественно к склоновым поверхностям (рис. 7б и 7в), в то время как выровненные водоразделы оказались практически не затронуты термоденудацией.

Расчет КПОРТ за 1966—1999 гг. показывает (см. рис. 5б), что среди всего ряда наблюдений именно к концу августа 1989 г. значения достигают критического уровня (более 1). С одной стороны, это свидетельствует об определенной валидности предложенного показателя. С другой стороны, значения 1989 г. сопоставимы или даже меньше значений не-

которых последних теплых летних периодов (в частности, 2016, 2020 и 2021 гг.). Вслед за [7] можно предположить, что после масштабной разгрузки склонов, произошедшей в конце лета 1989 г., для последующей обширной активизации термоденудации требуется более сильное и продолжительное тепловое воздействие.

Наиболее близок к предложенному показателю КПОРТ в методическом отношении коэффициент активизации КОС [1; 8], представляющий собой сумму таких климатических параметров, как относительная средняя летняя температура, относительная сумма летних осадков, относительная сумма зимних осадков и относительный тепловой импульс. Результаты расчетов с 1930 по 1990 гг. показали локальный пик значений в 1989 г. [1; 8]. При сохранении общего физического смысла КПОРТ рассматривается как накопительный показатель, формирующийся в процессе наблюдений, в то время как коэффициент активизации КОС позволяет оценивать оползневую опасность только постфактум. Кроме того, авторы коэффициента активизации КОС в последующих исследованиях отказались от его развития и применения, ограничиваясь общими относительными выводами о динамике климатических параметров в различные годы [16; 25].

Вполне вероятно, что помимо благоприятных климатических условий определенную роль в раз-

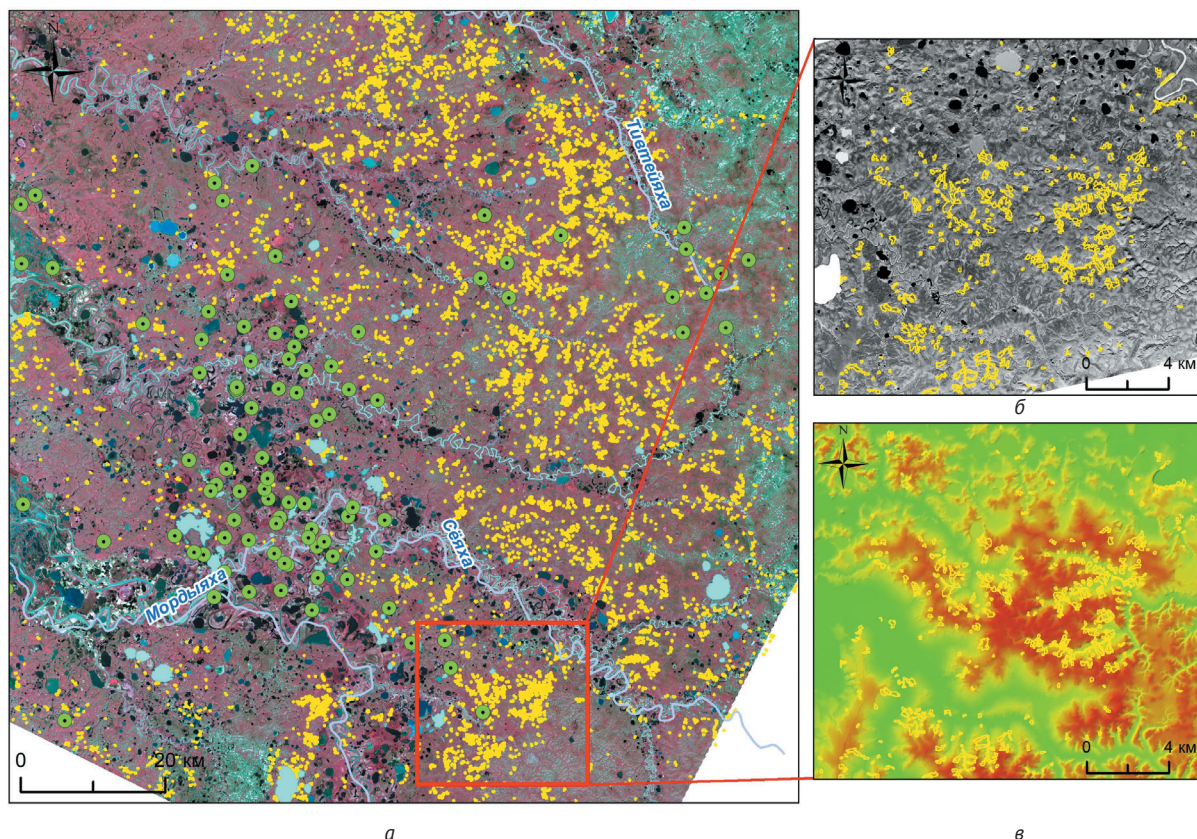


Рис. 7. Развитие КОФР в центральной части Ямала по итогам экстремального события 1989 г.: снимок Landsat-5, 20.07.1990 (а); снимок Corona/KH-4A, 28.09.1969 (б); ЦМР ArcticDEM (в). Криогенные оползни, сошедшие в августе 1989 г., показаны желтым цветом, поисково-разведочные скважины, пробуренные с января 1980 по август 1989 гг., показаны зеленым

Fig. 7. Development of retrogressive thaw slumps (RTSs) in the central part of Yamal following the extreme event of 1989: Landsat-5 satellite image, 20.07.1990 (a); Corona/KH-4A satellite image, 28.09.1969 (b); ArcticDEM DEM (c). Retrogressive thaw slumps occurred in August 1989 are yellow, exploration wells drilled from January 1980 to August 1989 are green

витии криогенного оползания в августе 1989 г. сыграло масштабное техногенное воздействие, обусловленное разведочным бурением в целях поиска залежей углеводородов (расположение скважин показано на рис. 7а) и началом строительства железной дороги «Обская — Бованенково» (по аналогии с активизацией термоденудации в буферной зоне Цинхай-Тибетской железной дороги [18]). Вибрационное воздействие при глубоком бурении скважин и многократных проездах тяжелой техники в летнее время могло отразиться на целостности мерзлых грунтов на расстоянии до нескольких десятков километров [42—44]. Однако это предположение требует специального математического моделирования.

Важным условием развития КОФР является распространение и глубина залегания пластовых льдов — основного источника макрольдистости в рассматриваемом регионе. Детальное фактическое представление о распространении пластовых льдов дает только геологическое бурение, которое имеет ограниченную пространственную репрезентативность [46]. Тем не менее предшествующими

исследованиями установлено повсеместное распространение пластовых льдов в пределах холмистых равнин в западной и центральной частях Ямала [8; 14]. При этом устойчивым признаком наличия залегающего льда является наличие различных форм термоденудации, также имеющих сплошное распространение на склонах [47].

Дополнительные индикационные признаки наличия пластовых льдов могут быть получены на основе привлечения методик дистанционного выявления различных генетических типов четвертичных отложений и форм рельефа. Наиболее проработаны подобные признаки для ледниковых ландшафтов севера Канады, где криогенные оползни преимущественно приурочены к погребенным глетчерным льдам, являясь основной причиной преобразований склонов различной крутизны [5; 6; 10].

Пластовые залежи льда вблизи поселка Харасавэй неоднократно исследовались в разные годы [14], однако до настоящего времени сохраняются две противоположных концепции их происхождения — глетчерная и внутригрунтовая [14; 48—52]. При этом результаты датирования вмещающих лед

отложений в научной литературе отсутствуют, что делает проблематичным однозначное решение проблемы генезиса пластовых льдов. Следовательно, до проведения дополнительных специальных геологических исследований площадное прогнозирование потенциальных рисков развития криогенных оползней в рамках совместного анализа высокодетальных космических снимков, ЦМР и материалов инженерно-геологических изысканий возможно только при учете обеих концепций развития территории в позднем неоплейстоцене.

Отдельно стоит отметить, что в отличие от других прибрежных районов активного развития термоденудации (например, острова Хершел, Канада [4; 11]) береговая зона Карского моря оказалась практически не подвержена криогенному оползанию — за весь рассматриваемый период новые морфологически выраженные термоцирки здесь не выявлены. В то же время оползневые явления широко развиты на континентальных склонах Северного Ледовитого океана и других акваторий Мирового океана, а также на дне термокарстовых озер [53; 54], генезис которых может быть связан с выбросами газа, в том числе при извержениях грязевых вулканов и/или разложении газовых гидратов [54]. При этом оползни возникают даже при небольших углах наклона дна (около 1°) [53].

В целом выявленные закономерности формирования КОФР под влиянием определенного сочетания природно-техногенных факторов позволяют организовать оперативный мониторинг и осуществлять краткосрочное прогнозирование развития криогенных оползней на основе ежесуточных метеонаблюдений и детальных морфометрических карт для любых заданных участков хозяйственной деятельности на полуострове Ямал.

Заключение

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

Масштабная активизация и развитие криогенных оползней, представляющих максимальную опасность при освоении нефтяных и газовых месторождений на полуострове Ямал, происходит лишь в отдельные годы (1989, 2012) при уникальном или достаточно редком сочетании климатических (раннее наступление теплого периода, повышенные среднесуточные значения температуры воздуха и количества осадков при устойчивом тренде их увеличения в течение летних месяцев), геологических (наличие пластовых залежей льда, наличие склонов крутизной более 2—3°) и предположительно антропогенных (вибрационное воздействие тяжелой техники в летний период) условий.

Предлагаемый климатический показатель опасности развития термоденудации (КПОРТ) достаточно однозначно отражает оба экстремальных события криогенного оползания на Ямале в 1989 и 2012 гг. (максимальная опасность выявлена при

значениях КПОРТ более 1); в дальнейшем предполагается его валидация на других участках севера Западной Сибири.

Согласованный учет метеонаблюдений (температура воздуха, осадки), морфометрических параметров (углы наклона поверхности) и геологического строения (глубина и мощность пластовых залежей льда, литология верхней части разреза) делает возможным практическую реализацию системы оперативного мониторинга и краткосрочного прогнозирования развития криогенных оползневых процессов на локальном уровне отдельных техногенных объектов.

Финансирование

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (№ 125020501403-7).

Литература/References

1. Лейбман М. О., Кизяков А. И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. — М.: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2007. — 206 с.
Leibman M. O., Kizyakov A. I. Retrogressive thaw slumps of Yamal and Yugorsky Peninsula. Moscow, Institute of the Earth's Cryosphere SB RAS, 2007, 206 p. (In Russian).
2. Пижанкова Е. И. Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков) // Криосфера Земли. — 2011. — № 15 (3). — С. 61—70.
Pizhankova E. I. Thermodenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky Islands (results of decoding aerospace images). Earth Cryosphere, 2011, no. 15 (3), pp. 61—70. (In Russian).
3. 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), pp. 151—178.
4. Lantuit H., Pollard W. H., Couture N., Fritz M., Schirmermeister 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), pp. 39—61.
5. 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), p. 034025.
6. 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), p. 983.
7. 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). — С. 222–237.
- Khomutov A. V., Babkina E. A., Khayrullin R. R., Dvornikov Yu. A. Factors of thermodenudation activation and thermo-cirque activity in Central Yamal in 2010–2018. Problems of the Arctic and Antarctic, 2024, no. 70 (2), pp. 222–237. (In Russian).
8. Лейбман М. О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. — Тюмень, 2005. — 262 с.
- Leibman M. O. Cryogenic slope processes and their geoeological consequences under the conditions of tabular ground ice distribution. Tyumen, 2005, 262 p. (In Russian).
9. Burn C. R. The thermal regime of a retrogressive thaw slump near Mayo, Yukon Territory. Canadian J. of Earth Sciences, 2000, vol. 37, no. 7, pp. 967–981.
10. Lewkowicz A. G. Headwall retreat of ground-ice slumps, Banks Island, Northwest Territories. Canadian J. of Earth Sciences, 1987, vol. 24, no. 6, pp. 1077–1085.
11. Lantuit H., Pollard W. H. Temporal stereophotogrammetric analysis of retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, vol. 5, no. 3, pp. 413–423.
12. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): учебное пособие для студентов дорожно-строительных специальностей вузов. — М.: Стройиздат, 1977. — 319 с.
- Maslov N. N. Soil mechanics in construction practice (landslides and their prevention): a textbook for students of road construction specialties. Moscow, Stroizdat, 1977, 319 p. (In Russian).
13. Лейбман М. О., Кизяков 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). — С. 486–500.
- Leibman M. O., Kizyakov A. I., Nesterova N. B., Tarasevich I. I. Classification of retrogressive thaw slumps for mapping and forecasting. Problems of the Arctic and Antarctic, 2023, no. 69 (4), pp. 486–500. (In Russian).
14. Васильчук Ю. К., Крылов Г. В., Подборный Н. Е. Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал // Криосфера Харасавэйского газоконденсатного месторождения. — Т. 1. — Тюмень: ООО «ТюменьНИИГипрогаз», 2006. — 347 с.
- Vasilchuk Yu. K., Krylov G. V., Podborny N. E. Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula. Cryosphere of the Kharasaveyskoye gas condensate field. Vol. 1. Tyumen, TyumenNIIGiprogaз LLC, 2006, 347 p. (In Russian).
15. Баранов А. В. Эрозионные процессы при нефтегазодобыче в условиях Крайнего Севера // Рос. химич. журн. — 2005. — Т. 49, № 4. — С. 120–124.
- Baranov A. V. Erosion processes in oil and gas production under the conditions of the Far North. Russian Chemical J., 2005, vol. 49, no. 4, pp. 120–124. (In Russian).
16. Бабкина Е. А., Лейбман М. О., Дворников Ю. А. и др. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 4. — С. 99–109.
- Babkina E. A., Leibman M. O., Dvornikov Yu. A., Fakashchuk N. Yu., Khayrullin R. R., Khomutov A. V. Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a consequence of regional and local climate and ground temperature changes. Meteorology and Hydrology, 2019, no. 4, pp. 99–109. (In Russian).
17. Nitze I., Heidler K., Barth S., Grosse G. Developing and testing a deep learning approach for mapping retrogressive thaw slumps. Remote Sensing, 2021, 13 (21), p. 4294.
18. Hu B., Wu Y., Zhang X., Yang B., Chen J., Li H., Chen X., Chen Z. Monitoring the thaw slump-derived thermokarst in the Qinghai-Tibet plateau using satellite SAR interferometry. J. of Sensors, 2019.
19. 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), p. 4042.
20. Нестерова Н. Б., Хомутов А. В., Лейбман М. О. и др. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов // Криосфера Земли. — 2021. — № 25 (6). — С. 41–50.
- Nesterova N. B., Khomutov A. V., Leibman M. O., Safonov T. A., Belova N. G. Inventory of thermocirques in the North of Western Siberia based on a mosaic of satellite images from 2016–2018. Earth's Cryosphere, 2021, no. 25 (6), pp. 41–50. (In Russian).
21. Leibman M., Nesterova N., Altukhov M. Distribution and morphometry of thermocirques in the north of West Siberia. Geosciences, 2023, 13 (6), p. 167.
22. 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), p. 5423.
23. Yang Y., Rogers B. M., Fisk 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, p. 113495.
24. Runge A., Nitze I., Grosse G. Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr. Remote Sensing of Environment, 2022, 268, p. 112752.
25. Тарасевич И. И., Лейбман М. О., Кизяков А. И. и др. Распространение и динамика термоцирков на ключевом участке Центрального Ямала по материалам дистанционного зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2024. — № 70 (3). — С. 391–411.

- Tarasevich I. I., Leibman M. O., Kizyakov A. I., Nesterova N. B., Khomutov A. V. Distribution and dynamics of thermocirques in a key area of Central Yamal based on remote sensing data. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2024, no. 70 (3), pp. 391—411. (In Russian).
26. Трофимов В. Т., Баду Ю. Б., Кудряшов В. Г., Фирсов Н. Г. Полуостров Ямал. Инженерно-геологический очерк. — М.: Изд-во МГУ, 1975. — 278 с.
- Trofimov V. T., Badu Y. B., Kudryashov V. G., Firsov N. G. Yamal Peninsula. Engineering and geological review. Moscow, Moscow State University Publishing, 1975, 278 p. (In Russian).
27. Васильев А. А., Малкова Г. В., Облогов Г. Е., Хомутов А. В. Тренды деградации мерзлоты Западной Арктики // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. — 2024. — Вып. 11. — С. 483—490.
- Vasiliev A. A., Malkova G. V., Oblogov G. E., Khomutov A. V. Permafrost degradation trends in the Western Arctic. Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and Northwest Russia, 2024, iss. 11, pp. 483—490. (In Russian).
28. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 320—333.
- Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Development monitoring of the C22 gas blowout Doublet object on Yamal peninsula using remote sensing data. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 320—333. (In Russian).
29. Меньшиков С. Н., Мельников И. В., Осокин А. Б. и др. Мониторинг опасных экзогенных процессов на месторождениях п-ова Ямал с использованием результатов космической съемки // Газ. пром-сть. — 2016. — № 7-8. — С. 126—132.
- Menshikov S. N., Melnikov I. V., Osokin A. B., Smolov G. K., Belenov A. V., Abrosimov A. V., Sizov O. S. Monitoring of hazardous exogenous processes at deposits on the Yamal Peninsula using satellite imagery results. *Gas Industry*, 2016, no. 7-8, pp. 126—132. (In Russian).
30. Rodenhizer H., Yang Y., Fiske G., Potter S., Windholz T., Mullen A., Watts J. D., Rogers B. M. A Comparison of Satellite Imagery Sources for Automated Detection of Retrogressive Thaw Slumps. *Remote Sensing*, 2024, no. 16 (13), p. 2361.
31. Li W., Hsu C.-Y., Wang S., Yang Y., Lee H., Liljedahl A., Witharana C., Yang Y., Rogers B. M., Arundel S. T. Segment Anything Model Can Not Segment Anything: Assessing AI Foundation Model's Generalizability in Permafrost Mapping. *Remote Sensing*, 2024, no. 16 (5), p. 797.
32. Huang L., Lantz T. C., Fraser R. H., Tiampo K. F., Willis M. J., Schaefer K. Accuracy, Efficiency, and Transferability of a Deep Learning Model for Mapping Retrogressive Thaw Slumps across the Canadian Arctic. *Remote Sensing*, 2022, no. 14 (12), p. 2747.
33. Declassified Data. United States Geological Survey. Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
34. Landsat Collections. Earth Engine Data Catalog. Available at: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/landsat>.
35. Sentinel-2. Earth Engine Data Catalog. Available at: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2>.
36. MOD11A2.061 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global 1km. Earth Engine Data Catalog. Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MOD11A2.
37. ArcticDEM. Polar Geospatial Center. Available at: <https://www.pgc.umn.edu/data/arcticdem/>.
38. Специализированные массивы для климатических исследований / ВНИИГМИ-МЦД. — URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>. Specialized Datasets for Climate Research. RRIHI — World Data Center. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>. (In Russian).
39. Fetterer F., Knowles K., Meier W. N., Savoie M., Windnagel A. K. Sea Ice Index. (G02135, Version 3). National Snow and Ice Data Center. Boulder, Colorado USA, 2017.
40. Zhenxiang F., Ninglian W., Yuwei W., Yujie Z. Greenland-Ice-Sheet Surface Temperature and Melt Extent from 2000 to 2020 and Implications for Mass Balance. *Remote Sensing*, 2023, no. 15 (4), p. 1149.
41. Ростов И. Д., Дмитриева Е. В., Рудых Н. И., Воронцов А. А. Климатические изменения термических условий Карского моря за последние 40 лет // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — № 65 (2). — С. 125—147.
- Rostov I. D., Dmitrieva E. V., Rudykh N. I., Vorontsov A. A. Climatic changes in the thermal conditions of the Kara Sea over the past 40 years. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2019, no. 65 (2), pp. 125—147. (In Russian).
42. ОДМ 218.2.030-2013. Методические рекомендации по оценке оползневой опасности на автомобильных дорогах. — М.: Росавтодор, 2013.
- ODM 218.2.030-2013. Methodological recommendations for assessing landslide hazard on highways. Moscow, Rosavtodor, 2013. (In Russian).
43. Рекомендации по количественной оценке устойчивости оползневых склонов. — М.: Стройиздат, 1984. — 79 с.
- Recommendations for Quantitative Assessment of Landslide Slope Stability. Moscow, Stroyizdat, 1984. 79 p. (In Russian).
44. Фоменко И. К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности: Дис. ... д-ра геолого-минерал. наук. — М., 2014. — 315 с.
- Fomenko I. K. Methodology for assessing and forecasting landslide hazard. Moscow, 2014, 315 p. (In Russian).
45. Verdonen M., Berner L. T., Forbes B. C., Kumpula T. Periglacial vegetation dynamics in Arctic Russia:

- decadal analysis of tundra regeneration on landslides with time series satellite imagery. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, iss. 10, pp. 1–17.
46. Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // *Криосфера Земли*. — 2002. — Т. 6, № 3. — С. 15–24.
- Streletskaya I. D., Leibman M. O. Cryogeochemical relationship between massive ice, cryopegs, and their host deposits in Central Yamal. *Earth's Cryosphere*, 2002, vol. 6, no. 3, pp. 15–24. (In Russian).
47. Хомутов А. В., Лейбман М. О., Андреева М. В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // *Вестн. ТюмГУ*. — 2012. — № 7. — С. 76–84.
- Khomutov A. V., Leibman M. O., Andreeva M. V. Methodology for mapping massive ground ice in Central Yamal. *Bulletin of Tyumen State University*, 2012, no. 7, pp. 76–84. (In Russian).
48. Крицук Л. Н., Дубровин В. А., Ястреба Н. В. Результаты комплексного изучения динамики береговой зоны Карского моря в районе метеостанции Марре-Сале с использованием ГИС-технологий // *Криосфера Земли*. — 2014. — № 18 (4). — С. 59–69.
- Kritsuk L. N., Dubrovkin V. A., Yastreba N. V. Results of a comprehensive study on the dynamics of the coastal zone of the Kara Sea near the Marre-Sale meteorological station using GIS technologies. *Earth's Cryosphere*, 2014, no. 18 (4), pp. 59–69. (In Russian).
49. Шполянская Н. А., Стрелецкая И. Д. Генетические типы пластовых льдов и особенности их распространения в Российской субарктике // *Криосфера Земли*. — 2004. — Т. 8, № 4. — С. 56–71.
- Shpolyanskaya N. A., Streletskaya I. D. Genetic types of massive ground ice and their distribution features in the Russian Subarctic. *Earth's Cryosphere*, 2004, vol. 8, no. 4, pp. 56–71. (In Russian).
50. Соломатин В. И., Белова Н. Г. Доказательства погребенного глетчерного происхождения пластовых льдов // *X Международная конференция по мерзлотоведению*. — Салехард: ТюмГНГУ, 2012. — С. 493–497.
- Solomatin V. I., Belova N. G. Evidence of buried glacial origin of massive ground ice. *X International Conference on Permafrost*. Salekhard, IUT, 2012, pp. 493–497. (In Russian).
51. Каплянская Ф. А., Тарноградский В. Д. К проблемам образования залежей реликтового глетчерного льда и сохранения изначально мерзлых морен // *Изв. ВГО*. — 1977. — Т. 109, вып. 4. — С. 314–319.
- Kaplyanskaya F. A., Tarnogradsky V. D. On the problems of relic glacier ice deposits formation and the preservation of initially frozen moraines. *Proceedings of RGO*, 1977, vol. 109, iss. 4, pp. 314–319. (In Russian).
52. Тарноградский В. Д. О происхождении пластовых залежей подземных льдов на Карском побережье п-ва Ямал // *Пластовые льды криолитозоны*. — Якутск: ИМ СО АН СССР, 1982. — С. 80–89.
- Tarnogradsky V. D. On the origin of massive underground ice deposits on the Kara coast of the Yamal Peninsula. *Massive Ice in the Cryolithozone*. Yakutsk, 1982, pp. 80–89. (In Russian).
53. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Бофорта, шельф Северного склона Аляски // *Арктика: экология и экономика*. — 2023. — Т. 13, № 2. — С. 201–210.
- Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Beaufort Sea, Alaska North Slope shelf. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 201–210. (In Russian).
54. Богоявленский В. И., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Новые данные об интенсивной дегазации Земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озера с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами // *Арктика: экология и экономика*. — 2023. — Т. 13, № 3. — С. 375–390.
- Bogoyavlensky V. I., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 375–390. (In Russian).

Информация об авторах

Сизов Олег Сергеевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Миронова Марина Александровна, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина (119991, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: mma.ecology@gmail.com.

DYNAMICS, DISTRIBUTION AND CLIMATIC CONDITIONS OF RETROGRESSIVE THAW SLUMPS DEVELOPMENT IN THE WESTERN PART OF THE YAMAL PENINSULA (2007—2023)

Sizov, O. S.¹, Mironova, M. A.²

¹ Oil and Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² Gubkin Oil and Gas University (Moscow, Russian Federation)

The article was received on January 15, 2025

For citing

Sizov O. S., Mironova M. A. Dynamics, distribution and climatic conditions of retrogressive thaw slumps development in the western part of the Yamal Peninsula (2007—2023). *Arctic: Ecology and Economy*, 2025, vol. 15, no. 2, pp. 177—190. DOI: 10.25283/2223-4594-2025-2-177-190. (In Russian).

Abstract

Retrogressive thaw slumps (RTSs) pose a significant hazard during the development of oil and gas fields on the Yamal Peninsula. The authors determine the dynamics and spatial distribution of retrogressive thaw slumps in the western part of the peninsula using multi-temporal highly detailed space images. They have established that large-scale activation of thermodenudation in this region occurs only in certain years under a unique or rather rare combination of natural and anthropogenic conditions. Having analyzed the archive of urgent meteorological observations at Marresale station for the last 55 years the researchers have identified the key combination of climatic conditions that contribute to the wide development of landslide processes. Such a combination is the early and stable onset of a warm period, elevated air temperatures and precipitation during the summer months (with a steady trend of their increase). The study has contributed to the development of a climatic index of the thermodenudation development risk (CPORT or TDRCI) that takes into account the duration of the period of active temperatures and the sum of precipitation during the warm period of the year. The proposed index unambiguously reflects both extreme retrogressive thaw slumps events in Yamal in 1989 and 2012. In the future, it is possible to validate the index using other northern regions of Western Siberia as an example. A coordinated accounting of meteorological observation data, morphometric parameters of the relief and features of the sheet ice spatial distribution in a given territory creates prerequisites for the practical implementation of a system of monitoring and forecasting the intensity of retrogressive thaw slumps' development both at the regional and local levels of individual industrial objects.

Keywords: *Yamal, retrogressive thaw slumps (RTS), Earth remote sensing (RS), permafrost, sheet ice, climate change.*

Funding

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic "Improving the efficiency and environmental safety of the hydrocarbon resources development of the shelf and defining the land of the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate" (no. 125020501403-7).

Information about the authors

Sizov, Oleg Sergeevich, PhD in Geography, Senior Researcher, Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: kabanin@yandex.ru.

Mironova, Marina Aleksandrovna, Graduate, Gubkin Oil and Gas University (65/1, Leninsky Ave., Moscow, Russia, 119991), e-mail: mma.ecology@gmail.com.

© Sizov O. S., Mironova M. A., 2025