

Оценка воздействия опасных криогенных процессов на инженерные объекты в Арктике*

В.И. Гребенец, Ф.Д. Юров, А.И. Кизяков, Л.И. Зотова, А.А. Маслаков, В.А. Толманов,
И.Д. Стрелецкая

Выполнены комплексные исследования состояния инфраструктуры российской Арктики, проведена оценка степени деформированности объектов и влияния опасных криогенных процессов на устойчивость зданий и сооружений. Установлено, что в районах с вечной мерзлотой в урбанизированной среде развивается ряд опасных для инфраструктуры криогенных процессов, которые спровоцированы (или активизированы) техногенным воздействием или климатическими изменениями. Практически все здания и системы жизнеобеспечения на территории национальных поселков Заполярья находятся в аварийном или предаварийном состоянии, в промышленных центрах доля деформированности инженерной инфраструктуры варьирует от 20% до 80%, что часто вызвано развитием опасных криогенных процессов. Для оценки негативного воздействия наиболее деструктивных процессов на инфраструктуру населенных пунктов разработана методика, учитывающая степень пораженности территории, продолжительность, повторяемость процессов. Оценка риска проведена для полутора десятков поселений российской Арктики, при этом особое внимание уделено инфраструктуре севера Западной Сибири. Проанализировано воздействие на инфраструктуру Арктики размещения отходов, осуществлена их классификация по степени влияния на вечномерзлые основания. Даны предложения по стабилизации геотехнической обстановки в городах Арктики.

Ключевые слова: Арктика, вечномерзлые грунты, криогенные процессы, устойчивость, деформации инженерной инфраструктуры, риски и ущербы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60080).

Введение

В последние десятилетия отмечается нарастание рисков и ущербов, связанных с негативным воздействием опасных криогенных процессов на здания, сооружения и транспортные системы в криолитозоне.

Устойчивость инженерной инфраструктуры связана с литокриогенными условиями территории, климатическими изменениями (повышение температуры воздуха в Арктическом регионе и увеличение количества осадков) и различными техногенными воздействиями. Наличие в основаниях сооружений подземных льдов разного генезиса и сильнольдистых дисперсных отложений, а также интенсив-



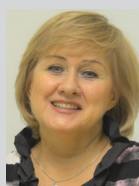
ГРЕБЕНЕЦ
Валерий Иванович
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



ЮРОВ
Федор Дмитриевич
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



КИЗЯКОВ
Александр Иванович
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



ЗОТОВА
Лариса Игоревна
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



МАСЛАКОВ
Алексей Алексеевич
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



ТОЛМАНОВ
Василий Андреевич
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



СТРЕЛЕЦКАЯ
Ирина Дмитриевна
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ность природных криогенных процессов во многом определяют инженерно-геокриологическое состояние оснований объектов различного назначения. В свою очередь, тепловые, механические, силовые, динамические и физико-химические воздействия на вечную мерзлоту, сопровождающие техногенез и отличающиеся разнообразием, разномасштабностью, разнонаправленностью и, зачастую, асинхронностью, вызывают существенные изменения в природных геокриологических условиях, существовавших до застройки. Ситуация зависит также от региональных геолого-географических факторов и типа хозяйственного освоения территории: методов инженерной подготовки площадок, принятых способов строительства, назначения объектов, условий эксплуатации и т. п.

Ключевым звеном при обеспечении устойчивости инфраструктуры в Арктике является анализ и прогноз развития опасных для объектов криогенных процессов, а также разработка методов борьбы с ними и сохранения нормального функционирования зданий и сооружений, что и явилось целью настоящих исследований.

Материалы и методы исследований

В ходе исследований применялся широкий спектр материалов, полученных в результате обработки данных дистанционного зондирования, численного моделирования, статистического анализа и полевых наблюдений авторов.

Проявления опасных криогенных процессов, особенности их географического распространения и современной динамики развития устанавливались при помощи тематического дешифрирования разновременных космических и аэрофотоснимков.

Для сбора актуальных сведений о состоянии инженерных объектов в Арктическом регионе проведен анализ фондовых материалов (в том числе отчетные материалы органов технического надзора, геокриологических служб и других организаций), литературных источников, а также полевые исследования в крупнейших заполярных городах и населенных пунктах России. В ходе этих наблюдений проводилась фиксация интенсивности проявления криогенных процессов на хозяйственно освоенных территориях, особое внимание уделялось несущей способности вмерзших в мерзлоту фундаментов, изменению температуры грунтов, динамике сезонного оттаивания, развитию морозной деструкции материалов конструкций. Оценка состояния объектов инфраструктуры проводилась путем визуального осмотра с фиксацией провалов, трещин и

других деформаций. Для оценки деформированности зданий и сооружений в пунктах исследований применялся показатель степени деформированности – отношение количества зданий и сооружений, имеющих различного вида повреждения, к их общему числу.

Для ряда населенных пунктов рассчитана интегральная оценка риска от воздействия наиболее опасных криогенных процессов: термоэрозии и термоабразии, термокарста, склоновых процессов, морозного пучения, морозобоинного растрескивания, наледообразования. Степень риска оценивалась по известной методике [1], учитывающей площадь поражения территории тем или иным криогенным процессом, его повторяемость и продолжительность.

Населенные пункты разделялись на шесть групп по степени опасности процессов для инфраструктуры с присвоением балла:

- 1 балл – при низкой степени опасности,
- 2 балла – при средней,
- 3 балла – при повышенной,
- 4 балла – при высокой,
- 5 баллов – при чрезвычайно высокой,
- 6 баллов – при максимальной.

Сумма этих баллов для каждого населенного пункта позволяла получить обобщающий показатель – интегральную оценку риска от развития криогенных процессов.

Результаты и обсуждения

Связь литокриогенной основы с распространением и динамикой криогенных процессов

Реакция вечномерзлых пород и конкретные изменения арктических геосистем, связанные с современными климатическими трендами и техногенными воздействиями, определяются в значительной степени региональными условиями. Практически повсеместно в Арктике отмечается современное потепление

климата [2, 3]. Среди локальных условий, определяющих отклик геосистем на внешние воздействия, ведущую роль играет литокриогенное строение (которое определялось палеогеографическими условиями накопления и промерзания отложений), температура и характер распространения вечномерзлых пород и современная структура растительного покрова. Следствием повышения летних температур воздуха является растепление мерзлоты и рост глубины сезонного оттаивания, приводящие к оттаиванию крупных неглубоко залегающих подземных льдов (пластовых и полигонально-жильных) [4–6]. Эти факторы ожидаемо приводят к активизации ряда опасных криогенных процессов [7–13]. Активизация этих процессов также зачастую связана или усилена техногенными воздействиями на участках хозяйственного освоения Арктических равнин.

Исследования проводились по следующим основным направлениям:

1) изучение сложных взаимодействий в системе «гидросфера–атмосфера–литосфера» для береговых геосистем;

2) изучение проявлений криогенных процессов на внутренних равнинах Арктики;

3) исследование активизации этих деструктивных процессов в зависимости от эволюции природной обстановки [10, 11].

Собраны исходные данные и проанализировано распространение опасных криогенных процессов на севере Западной Сибири. Эти районы в плейстоцене испытывали неоднократные морские трансгрессии с накоплением морских и прибрежно-морских отложений, при промерзании которых сформировались крупные скопления подземного льда. Континентальный этап накопления осадков на Западном Ямале, начавшийся 35–48 тыс. лет назад (МИС-3), сопровождался формированием льдистых пород и ростом мощных сингене-

тических полигонально-жильных льдов. Крупные залежи реликтового льда определяют форму и темпы разрушения берегов в условиях современного потепления Арктики, что представляет угрозу для береговых сооружений, в том числе и трубопроводов, идущих через Байдарацкую губу [12]. Для выявления связи проявлений криогенных процессов с литокриогенной основой использованы материалы по льдистости верхних горизонтов вечномерзлой толщи Западной Сибири: 1) за счет льда-цемента и шлирового льда, 2) за счет полигонально-жильных и пластовых льдов [13]. На севере криолитозоны увеличение глубины сезонного оттаивания приводит к повсеместному термокарсту, активизации криогенных оползней, росту термоцирков. Возрастает интенсивность сезонного пучения грунтов. Следует отметить, что экзогенные геологические процессы в криолитозоне редко развиваются отдельно, а обычно образуют так называемые парагенетические ряды или комплексы. Ведущими среди криогенных процессов и представляющими наибольшую опасность являются термокарст, термоэрозия, криогенные склоновые процессы, рост термоцирков, пучение, морозобойное растрескивание, воронки газового выброса [14, 15].

Крупные залежеобразующие льды полигонально-жильные, ядра бугров пучения и пластовые залежи встречаются реже, чем текстурные льды, но значение их огромно, так их вытаивание ведет к активизации опасных криогенных процессов. Вытаивание полигонально-жильных льдов и пластовых залежей льда приводит к существенному изменению поверхности, активизации термоэрозионных процессов. В результате этого образуются крупные термокарстовые котловины, термоцирки, термоэрозионные овраги.

Рост годовых сумм положительных температур в условиях неглубоко залегающих подземных льдов приводит к активизации термоденудации. На Центральном Ямале в последние годы наблюдается интенсивный рост термоцирков, связанных с вытаиванием пластовых льдов [16]. Появляются новые термоцирки, а также после 2012 г. отмечен новый цикл активизации стабилизировавшихся прежде форм (рис. 1).

Термоцирки широко распространены не только во внутренних частях арктических равнин, но и на морских побережьях. Разрушение морских арктических берегов, сложенных вечномерзлыми породами, происходит в результате комплекса взаимодействующих процессов, преимущественно термоабразии и термоденудации. Существенная активизация этих процессов наблюдается на участках с выходами подземных льдов (пластовых или мощных полигонально-жильных) непосредственно в береговых уступах



Рис. 1. Термоцирк с вскрывающимся пластовым льдом на Центральном Ямале. На заднем плане виден мостовой переход через реку железной дороги «Обская – Бованенково» (Фотография Кизякова А.И., август 2018 г.).

или в ближайшей прибрежной полосе.

На западном побережье острова Колгуев (Баренцево море) темпы термоабразии в 2002–2012 гг. составляли 1.7–2.4 м/год, средняя скорость роста термоцирков (скорость термоденудации) в тот же период составляла 2.6 м/год. Максимальные скорости термоденудации до 15.1 м/год отмечены в 2009–2012 гг. [17, 18]. Авторами получены предварительные данные по скоростям роста термоцирков в бухте Мира на острове Новая Сибирь (архипелаг Новосибирские острова, Восточно-Сибирское море): максимальные скорости, достигавшие 15.5 м/год в 2007–2015 гг., сменились снижением в 2015–2018 гг. до 5.3–8.0 м/год [19]. Высокая скорость отступления стенок термоцирков с вскрывающимися полигонально-жильными и пластовыми льдами представляет реальную опасность для объектов инфраструктуры на арктических равнинах.

Одним из наиболее опасных процессов для конструкций на Крайнем Севере является морозобойное растрескивание. Составленная картосхема отражает возможность формирования в разных регионах морозобойных трещин; ранжирование основано на количестве «ударов холода», геолого-географическая основа которых обусловлена числом резких понижений температуры (более чем на 15 °С) в определенных условиях темпов снегонакопления и литокриогенного строения. Анализ метеорологических данных за период с 2000 по 2018 г. показал, что наиболее активно морозобойное растрескивание развивается в центральной Якутии, в Бурятии, Магаданской области и т. п. Характерно, что морозобойное растрескивание в ряде регионов Арктики при потеплении климата за последние 25–30 лет фактически не развивается в природных ландшафтах, однако, как показали наши полевые исследования в Норильске, Игарке, Новом Уренгое, этот процесс весьма активен на участках, регулярно очищаемых от снега (автодорогах, аэродромах и др.).

Получены оригинальные результаты при исследовании термоэрозии: установлена высокая роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния, а также выявлена существенная активизация разрушения берегов в конце теплого периода, когда наблюдается совпадение максимума осадков и наибольшей глубины сезонного оттаивания. Деструктивные криогенные процессы изменяют не только природные ландшафтные условия, но и являются одной из главных причин разрушения инфраструктуры в Арктике. Так, рост термоэрозионных оврагов на территории Ямбургского месторождения составляет в среднем 5 м/год, но может достигать 15–20 м в течение теплого периода [20, 21].

Относительно новым и уникальным криогенным явлением для континентальной криолитозоны севера Западной Сибири являются воронки газового выброса. Впервые с применением комплекса данных дистанционного зондирования и полевых наблюдений выполнен анализ известных воронок и их бугров-предшественников на Ямале и Гыданском полуострове с целью выявления сходства и различия в их характеристиках [22]. Сделан вывод, что механизм формирования воронок сходен для всех изученных объектов и контролируется внутренней геологической и криолитологической структурой четвертичных толщ Западной Сибири. Формирование воронок может быть достаточно быстрым процессом; предполагается, что активизация воронок газового выброса происходит на фоне повышения температур мерзлых пород в местах широкого распространения неглубоко залегающих пластовых льдов. Пластовые льды могут содержать метан *in situ*, который перераспределяется при повышении температуры льда и повышении давления газа, или служить ловушкой для скопления метана из мерзлых пород, залегающих ниже [14].

В результате анализа серии разновременных космических снимков по Сеяхинской воронке установлено, что формирование бугра-предшественника началось после 2012 г., а уже летом 2017 г. произошел взрыв этого бугра с образованием воронки. Бугры-предшественники известных воронок отличаются в размерах: относительная высота изменяется от 2 до 6 м, диаметр основания от 20 до 55 м. Диаметры образовавшихся воронок находятся в диапазоне от 25 до 37 м [22]. Воронки быстро заполняются водой, и в этих озерах в первое время фиксируется высокая концентрация метана [23].

Выполненные исследования показали активное развитие деструктивных криогенных процессов на севере Западной Сибири – регионе активного хозяйственного освоения. Основные угрозы связаны с воронками газовых выбросов, термоэрозией и термоабразией берегов, ростом термоцирков [11, 24].

Активизация процессов при хозяйственном освоении

При хозяйственном освоении территории происходит активизация антропогенно стимулированных криогенных процессов, которые можно разделить на следующие группы:

- 1) связанные с дополнительным отоплением вечномерзлых пород (термокарст, термоэрозия и термоабразия);
- 2) связанные с дополнительным охлаждением пород (морозобойное растрескивание, сезонное пучение и наледообразование);
- 3) группа склоновых процессов (солифлюкция, криогенные оползни течения и скольжения, опасные перемещения техногенно образовавшихся отвалов);
- 4) процессы, не имеющие полных аналогов в естественных условиях – отопление пород и снижение при этом несущей способности вмороженных фундаментов; техногенное подтопление и засоление грунтов;

- 5) специфические процессы в сезонно-талом слое (морозная деструкция материалов подземных конструкций, неравномерное пучение и осадка грунтов в процессе промерзания – оттаивания).

Негативное воздействие на мерзлые грунты в пределах застроенных территорий во многом обусловлено изменением теплового баланса за счет изменения или уничтожения естественных покровов: растительного, почвенного и снежного.

Для оценки влияния перераспределения снега на состояние мерзлых пород в пределах городских территорий проведены натурные наблюдения в г. Норильске [25]. В ходе этих исследований выявлено, что около 600 отвалов на территории Норильска имеют толщину снега более 2.5 м. Такие отвалы занимают большие площади, что чрезвычайно негативно сказывается на зимнем охлаждении мерзлой толщи и, следовательно, снижает несущую способность вмороженных свай. Таяние снегоотвалов в мае – июне приводит к подтоплению городских территорий (в том числе участков под зданиями, холодных проветриваемых подполий) и развитию неравномерных осадок и просадок грунтов.

Снегоотвалы в черте города превышают высоту естественного снежного покрова в 8–10 раз. Например, в 2019 г. к концу апреля мощность естественного снежного покрова составляла 70 см, а высота снегоотвалов на территории города достигала 3–5 м. Установлено, что при увеличении мощности снежного покрова изменение температуры мерзлых грунтов на глубине 10 м происходит практически экспоненциально. Проведенные расчеты показали, что при увеличении мощности снежного покрова с 0.7 до 1.5 м и моделировании с перспективой на 30 лет температура на уровне нулевых годовых амплитуд (на глубине 10 м) изменится на 2.5 °C в положительную сторону; при его увеличении до 2 м – на 2.75 °C [25].

Еще одним немаловажным фактором, оказывающим негативное влияние на мерзлые породы и приводящим к снижению устойчивости инженерных объектов в криолитозоне, является складирование отходов различных типов. Проблема складирования твердых отходов обостряется за счет хрупкости экосистем, водоупорных свойств мерзлых пород, развития деструктивных криогенных процессов, что осложняется современными трендами к потеплению климата. В целом, воздействие твердых отходов на окружающую среду в криолитозоне делится на следующие виды:

- механическое – накопление вещества и изменение рельефа, условий дренированности;
- физико-химическое, приводящее к загрязнению грунтов, поверхностных и подземных вод самими отходами и продуктами их распада;

- силовое – увеличения давления на грунтовые основания;
- тепловое, вызывающее отепление и разрушение вечномерзлых грунтов, активизацию опасных криогенных процессов.

По результатам проведенных исследований [26] выделено восемь основных типов складирования отходов в криолитозоне, связанных с определенным характером их накопления (табл. 1).

Наиболее негативное воздействие оказывают шлако-, шламо- и хвостохранилища, вещество в которые поступает в виде горячих суспензий и расплавов, обладающих высокой химической агрессивностью. Крупные подобные объекты существуют в Норильске (рис. 2), Валькумее, Куларе, Лонгйире (Шпицберген) и других горнодобывающих районах.

Оценена степень деформированности объектов (рис. 3) в населенных пунктах российской Арктики. Наибольшая деформированность (почти 100%) характерна для малых национальных поселков и ряда городов Крайнего Севера, испытавших сильное

сокращение населения с 90-х годов прошлого века. Доля деформированных объектов в городах Арктики различна – в Воркуте порядка 80%, в Игарке почти 100% с учетом старой деревянной застройки, в Виллюйске 70%. Менее критичная ситуация наблюдается в Тикси (22%), Норильске (25%), Дудинке и Диксоне (35% без учета старой деревянной застройки). Анализ причин деформаций зданий и сооружений показал, что потепление климата или локальные природные изменения рельефа вызывают лишь 15–20% деформаций, а причиной подавляющего числа деформаций (до 85%) становятся опасные криогенные процессы, спровоцированные или активизированные за счет техногенного воздействия [27].

Таблица 1. Типы складирования отходов в криолитозоне

№	Тип складирования	Негативное воздействие на мерзлые породы и инфраструктуру
1.	Устройство на рельефе золоотвалов и шлако-, шламо- и хвостохранилищ	Разрушение мерзлоты при складировании горячих расплавов и суспензий, техногенное засоление, приводящее к изменению теплофизических свойств пород
2.	Складирование отвалов вскрышной породы при разработке месторождений открытым способом	Активизация склоновых процессов, формирование техногенных каменных глетчеров
3.	Полигоны складирования твердых бытовых отходов	Тепловыделение при разложении органики и образование таликовых зон, формирование непрогнозируемой инженерно-геологической среды на месте полигонов, выведенных из эксплуатации
4.	Складирование отходов лесопереработки	Тепловыделение при разложении опилок, коры и т. д., опасность возникновения пожаров
5.	Складирование бочек с остатками ГСМ	Загрязнение мерзлых грунтов ГСМ и изменение их теплофизических свойств, уничтожение растительного покрова
6.	Площадки хранения нефтепродуктов	Загрязнение мерзлых грунтов ГСМ и изменение их теплофизических и прочностных свойств, деформации резервуаров вплоть до их разрушения
7.	Площадки складирования снега, вывозимого с застроенных территорий при снегоуборке	Повышение температуры мерзлоты (вплоть до формирования несквозных таликов), активизация нивации, термоэрозии и солифлюкции на склонах
8.	Заброшенные жилые и промышленные здания, где происходит несанкционированное складирование мусора	Возможно как негативное (за счет сброса тепловыделяющих бытовых и химически агрессивных отходов), так и нейтральное влияние

Специфика регионов традиционного землепользования

Для районов традиционного землепользования арктических территорий выделяются специфические виды антропогенного воздействия. Так, для районов развития крупностадного оленеводства на территории НАО, ЯНАО и Таймырского (Долгано-Ненецкого) района Красноярского края отмечается нарастание дигрессии пастбищ за счет перевыпаса и активизация ряда криогенных процессов [28]. Наиболее остро эта проблема ощущается в ЯНАО, где общее поголовье оленей колеблется в пределах 750–800 тыс. голов. Площадь косвенного негативного влияния промышленных объектов в ЯНАО составляет около 3 млн га, при этом более половины приходится на зоны отчуждения магистральных и промысловых трубопроводов. Максимальная пастбищная нагрузка приходится на южную и центральную часть полуострова Ямал, особенно в местах постоянных прогонов крупных стад оленей по узким коридорам среди разветвленной сети промышленных объектов. Скорость восстановления выбитых и стравленных пастбищ изменяется от 8 до 50 лет в зависимости от типа напочвенного покрова.

Еще одним специфическим видом воздействия является создание в мерзлых породах подземных хранилищ – ледников, играющих важную роль в быте коренных малочисленных народов Севера. Проведены исследования крупнейшего ледника Лорино на Чукотском полуострове длиной 114 м и площадью 330 м² [29]. Анализ температурного режима ледника показал, что среднезимняя температура в его камерах колеблется в пределах -4.8...-6.2 °С, а летняя -3.5...-4.0 °С. Его стабильность обеспечивается за счет пассивной вентиляции холодным воздухом зимой (вклад которого в промораживание пород от года к году варьирует в пределах 8–44%) и увеличения термической



Рис. 2. Хвостохранилище «Лебяжье», Норильский промышленный район (фотография Гребенца В.И., август 2018 г.).



Рис. 3. Деформация дорожного покрытия в результате развития термокарста и вытаивания полигонально-жилиных льдов под насыпью дороги (фотография Толманова В.А., сентябрь 2018 г.).

инертности в камерах и коридорах за счет хранения речного льда.

Оценка рисков от активизации криогенных процессов на освоенных территориях

Оценка рисков от воздействия опасных криогенных процессов была проведена для 37 муниципальных образований Арктического региона. Количественная оценка выполнялась для термоэрозии и термоабразии, термокарста, морозного пучения, морозобойного растрескивания, склоновых процессов и наледообразования. Эта оценка позволила выделить населенные пункты, для которых эти процессы представляют наибольшую опасность. Так, максимальная степень риска от активизации морозобойного растрескивания была получена для Хатанги; наледообразования – для Билибино и Хонуу;

морозного пучения – для Тарко-Сале; склоновых криогенных процессов – для Норильска, Билибино, Верхоянска, Депутатского и Хонуу; термоэрозии и термоабразии – Среднеколымска и Ямбурга.

Полученная в результате интегральная оценка степени опасности позволила распределить исследуемые населенные пункты по трем группам (табл. 2):

- 1) с максимальной вероятностью поражения освоенных территорий опасными криогенными процессами (Норильск, Хатанга и др.);
- 2) со средней степенью угрозы для инженерных объектов (Ямбург, Диксон и др.);
- 3) с относительно удовлетворительной ситуацией с точки зрения активизации опасных процессов (Новый Уренгой, Лабытнанги и др.).

Формирование природно-техногенных геокриологических комплексов

Для ряда населенных пунктов на основании полевых исследований, анализа литературных источников и обработки данных дистанционного зондирования Земли проведено выделение специфических природно-техногенных геокриологических комплексов (ПТГК) [30]. Например, для территории Норильска выделено 17 ПТГК, в большинстве из которых отмечаются тенденции к отеплению и деградации мерзлоты (исключение составляют лишь ВПП аэродрома и другие объекты, регулярно очищаемые от снега в зимний период, что приводит к дополнительному охлаждению мерзлых пород); в пределах некоторых из этих комплексов (карьеры открытой добычи, шлако- и шламохранилища, территории заводов цветной металлургии) мерзлота полностью исчезла. Такая пестрая картина обусловлена как исходной мозаичностью ландшафтно-мерзлотных условий, так и большими различиями в виде техногенного воздействия. Для территории Игарки выделено 11 основных ПТГК, для Ямбургского ГКМ – 7 комплексов.

Управление мерзлотной обстановкой

Одной из важнейших задач при хозяйственном освоении регионов Крайнего Севера является необходимость обеспечения надежности инженерной инфраструктуры, прежде всего, с учетом ухудшающихся геокриологических условий при климатических изменениях.

Основными направлениями управления мерзлотной обстановкой для обеспечения устойчивости зданий и сооружений являются:

- укрепление мерзлоты, повышение ее несущей способности, сокращение деятельного слоя (зоны воздействия касательных сил морозного пучения на сваи);

- протаивание в южной криолитозоне линз или маломощных высокотемпературных слоев мерзлоты;
- сохранение “*status quo*” для вечномерзлых оснований существующих объектов.

Могут применяться как «пассивные» (направлены на изменение условий внешнего теплообмена в системе «атмосфера–поверхность–грунт»), так и «активные» методы (воздействие на грунты по их глубине). Для Арктической зоны России наиболее актуальны методы, направленные на укрепление мерзлоты.

К «пассивным» методам можно отнести:

- оптимизацию застройки, ее уплотнение за счет возведения зданий с эффективно действующими холодными проветриваемыми подпольями;
- водоотведение;
- обустройство мест складирования отходов;
- снегоочистку территорий;
- теплоизоляцию в теплое время года локальных участков.

Наши наблюдения показали, что сочетание снегоуборки и летней теплоизоляции поверхности может обеспечить понижение температуры мерзлоты на 2–3 °С, а также сокращение глубины СТС на 30–50%.

«Активный» метод, тепловое воздействие на грунты может осуществляться за счет подачи охлаждающей среды (хладагента) в глубинные охлаждающие колонки. Наиболее интенсивно совершенствуются и широко применяются автономно действующие сезонноохлаждающие устройства, использующие неограниченные на Севере запасы природного холода для его «перекачки» в грунты. В последние 20–30 лет в Арктике предпочтение отдается парожидкостным устройствам.

Заключение

Проведены комплексные исследования негативного воздействия

Таблица 2. Группировка населенных пунктов по степени опасности воздействия опасных криогенных процессов

Степень риска	Муниципальное образование	Значение интегральной оценки опасности (в баллах)
Относительно удовлетворительная	Тарко-Сале*	11
	Анадырь	12
	Новый Уренгой	14
	Лабытнанги	15
	Надым	17
	Харп*	17
Средняя	Белая гора*	18
	Елецкий*	18
	Тикси	18
	Зырянга*	19
	Тазовский*	19
	Дудинка	20
	Игарка	20
	Лорино*	20
	Новый Порт*	20
	Салехард	20
	Верхоянск*	21
	Кюсюр*	21
	Мыс Шмидта*	21
	Чокурдах*	21
	Ямбург	21
	Амдерма*	22
	Оленёк*	22
	Певек*	22
	Воркута	23
	Диксон*	23
	Жиганск*	23
	Казачье*	23
	Хонуу*	23
	Черский*	23
Высокая	Билибино	24
	Волочанка*	24
	Депутатский*	24
	Нижнеянск*	24
	Хатанга*	25
	Среднеколымск*	28
	Норильск	28

*Оценка проводилась для территории в радиусе 8–10 км от населенного пункта.

криогенных процессов на инженерную инфраструктуру Арктического региона России. Установлено, что на хозяйственно освоенных территории

ях в криолитозоне за счет техногенного воздействия (удаления естественных покровов, отепления грунтов и т. д.) происходит активизация опасных для инфраструктуры криогенных процессов.

Рассчитан интегральный показатель степени риска от активизации процессов (термокарст, термоэрозия и термоабразия, криогенные оползни и движение каменных глетчеров, морозное пучение, морозобойное растрескивание, наледообразование) для 37 городов и поселений российской Арктики. Выявлено, что в контексте климатических изменений и при нарастании техногенной нагрузки особую опасность для инженерных объектов представляют процессы, активизация которых связана с дополнительным отоплением поверхности. Натурные наблюдения показали, что в западной части Арктики наблюдается новый цикл активизации термоцирков, связанных с вытаяванием пластовых льдов. Установлена высокая роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния для термоэрозионных оврагов.

Проанализированы воздействия на мерзлые породы и инженерные объекты складирования бытовых и промышленных отходов. На основе полевых наблюдений в населенных пунктах криолитозоны выделено восемь типов накопления отходов, а также выявлены четыре вида их воздействия.

Осуществлена оценка негативного влияния перераспределения снега при снегоуборке на застро-

енных территориях за счет формирования мощных отвалов, которые отепляют мерзлоту, активизируют опасные криогенные процессы и вызывают деформации зданий и сооружений.

Установлено, что при хозяйственном освоении территории в криолитозоне происходит трансформация естественных условий и формирование специфических природно-техногенных геокриологических комплексов, свойства которых определяются типом антропогенного воздействия и исходными условиями природной среды. В пределах этих комплексов прослеживается особое сочетание криогенных процессов и фиксируется различная устойчивость инфраструктуры даже для однотипных объектов.

Охарактеризованы основные методы управления мерзлотной обстановкой для обеспечения устойчивости инфраструктуры в Арктике.

Литература

1. Д.Н. Айбулатов, Т.Г. Глазовская, В.И. Гребенец, А.А. Деркачев, С.А. Сократов, В.А. Толманов, А.С. Турчанинова, Т.И. Хисматуллин, Д.И. Школьный, А.Л. Шнытпарков
Развитие транспортных сетей Сибири и Дальнего Востока с учетом опасных природных процессов и явлений, РФ, Москва, Перо, 2021, 200 с.
2. J. Cohen, J. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones
Nat. Geosci., 2014, 7, 627. DOI: 10.1038/ngeo2234.
3. E.A. Barnes, L.M. Polvani
J. Climate, 2015, 28(13), 5254. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.
4. V. Romanovsky, K. Isaksen, D. Drozdov, O. Anisimov, A. Instanes, M. Leibman, A.D. McGuire, N. Shiklomanov, S. Smith, D. Walker
В AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2017, pp. 65–102. (<https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>).
5. B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, etc.
Nat. Commun., 2019, 10(1), 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
6. А.А. Васильев, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, Д.С. Дроздов, Ю.В. Коростелев, г.В. Малкова, г.Е. Облогов, О.Е. Пономарева, М.Р. Садуртдинов, И.Д. Стрелецкая, Д.А. Стрелецкий, Е.В. Устинова, Р.С. Широков
Криосфера Земли, 2020, 24(2), 15. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
7. М.Н. Григорьев, В.В. Куницкий, Р.В. Чжан, В.В. Шепелев
География и природные ресурсы, 2009, №2, 5.
8. F. Günther, P.P. Overduin, A.V. Sandakov, G. Grosse, M.N. Grigoriev
Biogeosciences, 2013, 10(6), 4297. DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
9. I. Nitze, S.W. Cooley, C.R. Duguay, B.M. Jones, G. Grosse
The Cryosphere, 2020, 14(12), 4279. DOI: 10.5194/tc-14-4279-2020.
10. В.И. Гребенец, И.Д. Стрелецкая, А.И. Кизяков
В Сб. Тез. докл. Всерос. науч. конф. «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях» (РФ, Сочи, 25–28 сентября 2019), РФ, Москва, ИГ РАН, 2019, с. 39–41.
11. A.I. Kizyakov, I.D. Streletskaia, V.I. Grebenets
В Proc. American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting (USA, CA, San Francisco, 9–13 December, 2019), USA, CA, San Francisco, AGU, 2019, C41D–1490. (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/489856>).
12. I. Streletskaia, A. Kizyakov, A. Vasiliev, G. Oblov, D. Nekrasov
В Сб. Тез. докл. Междунар. конф. «Криосферные ребусы» (РФ, Пушино, 15–18 апреля, 2019), РФ, Пушино, ИФХиБПП РАН, 2019, с. 141–142.
13. Карта генетических типов и льдистости верхней 10-метровой части разреза многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. Масштаб 1:1 000 000, под ред В.Т. Трофимова, СССР, Воронеж, ПГО «Центргеология», 1982.
14. И.Д. Стрелецкая, М.О. Лейбман, А.И. Кизяков, г.Е. Облогов, А.А. Васильев, А.В. Хомутов, Ю.А. Дворников
Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2017, №2, 91.
15. А.И. Кизяков, И.Д. Стрелецкая, В.И. Гребенец, Ю.Б. Баду
В Мат. докл. XIV Общероссийской науч.-практ. конф.

- «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (РФ, Москва, 11–14 декабря, 2018), РФ, Москва, Геомаркетинг, 2018, с. 268–272.
16. **A. Khomutov, M. Leibman, Y. Dvornikov, A. Gubarkov, D. Mullanurov, R. Khairullin**
В Proc. 4th WLF 2017 “Advancing Culture of Living with Landslides”, Eds M. Mikoš, V. Vilimek, Y. Yin, K. Sassa, DE, Cham, Springer Int. Publ., 2017, pp. 209–216.
DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.
 17. **А.И. Кизяков, F. Günther, М.В. Зимин, А.В. Соноушкин, Е.Ю. Жданова**
В Мат. докл. XV Общерос. науч.-практ. конф. «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (РФ, Москва, 26–29 ноября, 2019), РФ, Москва, Геомаркетинг, 2019, с. 274–279.
 18. **F. Günther, A.I. Kizyakov, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin**
В Мат. Междунар. конф. «Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов (Опасные явления)» (РФ, Ростов-на-Дону, 13–23 июня, 2019), РФ, Ростов-на-Дону, Изд. ЮНЦ РАН, 2019, с. 221–222 (англ. яз.).
 19. **A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, S. Wetterich**
В Proc. 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium – Book of Abstracts (Germany, Potsdam, 10–14 September, 2018), Eds F. Günther, G. Grosse, B.M. Jones, Germany, Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein.
(https://epic.awi.de/id/eprint/48600/1/Coastal_destruction_in_the_western_and_eastern-most_occurrence_of_tabular_ground_ice_in_the_Eurasian_Arctic.pdf).
 20. **V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets**
В Proc. AGU 100 Advanced Earth and Space Science Fall Meetings (USA, Washington, DC, 10–14 December, 2018), GC33E-1407. Publ. 12 Dec 2018.
(<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/377931>).
 21. **В.А. Толманов, В.И. Гребенец**
В Сб. Тезисы докл. Всерос. конф. «Междисциплинарные научные исследования в целях освоения горных и арктических территорий» (РФ, Сочи, 24–29 сентября, 2018), РФ, Москва, ИГ РАН, Гляциологическая ассоциация, 2018, с. 24.
 22. **A. Kizyakov, M. Leibman, M. Zimin, A. Sonyushkin, Y. Dvornikov, A. Khomutov, D. Dhont, E. Cauquil, V. Pushkarev, Y. Stanilovskaya**
Remote Sensing, 2020, 12(14), 2182.
DOI: 10.3390/rs12142182.
 23. **Y.A. Dvornikov, M.O. Leibman, A.V. Khomutov, A.I. Kizyakov, P.B. Semenov, I. Bussmann, E.M. Babkin, B. Heim, A. Portnov, E.A. Babkina, I.D. Streletskaia, A.A. Chetverova, A. Kozachek, H. Meyer**
Permafrost Periglac. Process., 2019, 30(3), 146.
DOI: 10.1002/ppp.2014.
 24. **В.И. Гребенец, И.Д. Стрелецкая, А.И. Кизяков**
В Сб. Тезисы докл. Всерос. науч. конф. «Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях» (РФ, Сочи, 25–28 сентября, 2019), РФ, Москва, ИГ РАН, 2019, с. 39.
 25. **В.И. Гребенец, В.А. Толманов**
Лед и снег, 2021, 61(3), 457.
DOI: 10.31857/S2076673421030101.
 26. **V. Grebenets, V. Tolmanov, F. Iurov, P. Groisman**
Environ. Res. Lett., 2021, 16(10), 105007.
DOI: 10.1088/1748-9326/ac2375.
 27. **В.И. Гребенец, А.И. Кизяков, А.А. Маслаков, С.А. Сократов, И.Д. Стрелецкая, В.А. Толманов, Ф.Д. Юров**
Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2022, №2, 25.
 28. **N. Tumel, L. Zotova**
Geosciences, 2019, 9(8), 353.
DOI: 10.3390/geosciences9080353.
 29. **A.A. Maslakov, K.E. Nyland, N.N. Komova, F.D. Yurov, K. Yoshikawa, G.N. Kraev**
Geogr. Env. Sustain., 2020, 13(3), 49.
DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
 30. **В.И. Гребенец, А.А. Найдено, В.А. Толманов, А.Г. Хайрединова, В.Б. Павлушин**
В Сб. науч. трудов «Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых», Вып. 19 (по мат. годичной сессии ИС РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, РФ, Москва, 4–5 апреля, 2017), РФ, Москва, РУДН, 2017, с. 448–453.

English

Assessment of Hazardous Cryogenic Processes Impact on Engineering Facilities in the Arctic*

Valery I. Grebenets

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
vgreb@inbox.ru

Fedor D. Iurov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
fdiurov@gmail.com

Alexander I. Kizyakov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
akizyakov@mail.ru

Larisa I. Zotova

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
zotlar@geogr.msu.ru

Alexey A. Maslakov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Vasily A. Tolmanov

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
vasiliytolmanov@gmail.com

Irina D. Streletskaia

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory,
Moscow, 119991, Russia
irinastrelets@gmail.com

Abstract

Comprehensive studies of the state of the infrastructure in the Russian Arctic were carried out. The degree of deformation of objects and the impact of dangerous cryogenic and nival-glacial processes on the stability of buildings and constructions were assessed. It was established that a number of cryogenic processes that are dangerous for the infrastructure were developing in urbanized areas of the permafrost zone. They are caused (or activated) by anthropogenic impact or by climatic changes. Thermokarst, thermal erosion and thermal abrasion of banks, icings formation are activating. The tangential forces of frost heaving increase due to the increase of the active layer depth. Almost all the buildings and the life support systems at the territories of the national settlements of the Polar region are in an emergency or pre-emergency state. The percentage of deformation of the engineering infrastructure varies from 20% to 80% in industrial centers, which is often caused by the development of dangerous cryogenic processes. A methodic was developed to assess the negative impact of the most destructive processes on the infrastructure of settlements. It takes into account the degree of damage to the territory, the duration, and repeatability of processes. The risk assessment was carried out for one and a half dozen settlements in the Russian Arctic, with special attention paid to the infrastructure of the north of Western Siberia. The impact of waste disposal on the infrastructure of the Arctic was analyzed. A classification was proposed based on the degree of their influence on permafrost foundations. Proposals on stabilization of geotechnical situation in Arctic cities are given.

Keywords: Arctic, permafrost, cryogenic processes, sustainability, deformation of engineering infrastructure, risks and damages.

**The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60080).116110810013-5).*

Images & Tables



Fig. 1. Thermocirque with tabular ground ice exposure in Central Yamal. On the background one can see the Obskaya – Bovanenkovo railway bridge crossing over a river (Photo by Kizyakov A.I., August 2018).



Fig. 2. Tailing dump «Lebyazhe», Norilsk industrial region (photo by Grebenets V.I., August 2018).

Table 1. *Types of storage of waste on permafrost*

№	Type of storage	Negative impact on frozen ground and infrastructure
1.	Installation of ash dumps and slag-sludge-tailing dumps on the relief	Destruction of permafrost during the storage of hot melts and suspensions, technogenic salinization, leading to a change in the thermal properties of rocks
2.	Storage of overburden dumps during open pit mining	Activation of slope processes, formation of technogenic stone glaciers
3.	Landfills for the trash storage	Heat release during the decomposition of organic matter and the formation of talik (thaw) zones, formation of an unpredictable engineering and geological environment at the site of landfills decommissioned
4.	Storage of timber waste	Heat generation from the decomposition of sawdust, bark, etc., fire hazard
5.	Storage of barrels with fuel residues	Pollution of frozen soils with fuels and lubricants and changes in their thermal and physical properties, destruction of vegetation cover
6.	Oil storage sites	Pollution of frozen soils with fuels and lubricants, changes in their thermal, and physical properties, bearing capacity, deformation of storage tanks up to their destruction
7.	Storage areas for snow removed from built-up areas during snow removal	An increase in permafrost temperature (up to the formation of taliks), activation of nivation, thermal erosion and solifluction on slopes
8.	Abandoned residential and industrial buildings where unauthorized waste storage occurs	Both negative (due to the discharge of hot and cold water and chemically aggressive waste) and neutral impact are possible

**Fig. 3.** *Deformation of the road surface as a result of the development of thermokarst and the melting of polygonal ice under the road embankment (photo by Tolmanov V.A., September 2018).*

Table 2. Grouping of settlements according to the degree of danger from the impact of hazardous cryogenic processes

Degree of risk	Settlement	The value of the integral hazard assessment (in points)
Relatively satisfactory	Tarko-Sale*	11
	Anadyr	12
	New Urengoy	14
	Labytnangi	15
	Nadym	17
	Harp*	17
Average	Belaya Gora*	18
	Yeletsky*	18
	Tiksi	18
	Zyryanka*	19
	Tazovsky*	19
	Dudinka	20
	Igarka	20
	Lorino*	20
	Noviy Port*	20
	Salekhard	20
	Verkhoyansk*	21
	Kyusyur*	21
	Cape Schmidt*	21
	Chokurdah*	21
	Yamburg	21
	Amderma*	22
	Olenyok*	22
	Pevek*	22
	Vorkuta	23
	Dixon*	23
	Zhigansk*	23
	Kazachye*	23
	Honuu*	23
	Chersky*	23
High	Bilibino	24
	Volochanka*	24
	Deputatskiy*	24
	Nizhneyansk*	24
	Khatanga*	25
	Srednekolymsk*	28
	Norilsk	28

*The assessment was carried out for the area within a radius of 8–10 km around the settlement.

References

1. D.N. Aybulatov, T.G. Glazovskaya, V.I. Grebenets, A.A. Derkacheva, S.A. Sokratov, V.A. Tolmanov, A.S. Turchaninova, T.I. Khismatullin, D.I. Shkolnyj, A.L. Shnyarkov
Development of Transport Networks of Siberia and the Far East Taking into Account Dangerous Natural Processes and Phenomena [Razvitie transportnykh setey Sibiri i Dalnego Vostoka s uchetom opasnykh prirodnykh protsessov i yavleniy], RF, Moscow, Pero Publ. House, 2021, 200 pp. (in Russian).
2. J. Cohen, J. Screen, J. Furtado, M. Barlow, D. Whittleston, D. Coumou, J. Francis, K. Dethloff, D. Entekhabi, J. Overland, J. Jones
Nat. Geosci., 2014, 7, 627.
DOI: 10.1038/ngeo2234.
3. E.A. Barnes, L.M. Polvani
J. Climate, 2015, 28(13), 5254.
DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00589.1.
4. V. Romanovsky, K. Isaksen, D. Drozdov, O. Anisimov, A. Instanes, M. Leibman, A.D. McGuire, N. Shiklomanov, S. Smith, D. Walker
In AMAP, 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), DK, Odder, Gylling, Narayana Press, 2017, pp. 65–102. (<https://www.amap.no/documents/download/2987/inline>).
5. B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzli, H. Matthes, etc.
Nat. Commun., 2019, 10(1), 264.
DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
6. A.A. Vasilev, A.G. Gravis, A.A. Gubarkov, D.S. Drozdov, Yu. V. Korostelev, G.V. Malkova, G.E. Oblogov, O.E. Ponomareva, M.R. Sadurtdinov, I.D. Streletskaya, D.A. Streletskij, E.V. Ustinova, R.S. Shirokov
Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2020, 24(2), 15 (in Russian).
DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
7. M.N. Grigorev, V.V. Kunitskij, R.V. Chzhan, V.V. Shepelev
Geogr. Nat. Resour., 2009, 30(2), 101.
DOI: 10.1016/j.gnr.2009.06.002.
8. F. Günther, P.P. Overduin, A.V. Sandakov, G. Grosse, M.N. Grigoriev
Biogeosciences, 2013, 10(6), 4297.
DOI: 10.5194/bg-10-4297-2013.
9. I. Nitze, S.W. Cooley, C.R. Duguay, B.M. Jones, G. Grosse
The Cryosphere, 2020, 14(12), 4279.
DOI: 10.5194/tc-14-4279-2020.
10. V.I. Grebenets, I.D. Streletskaya, A.I. Kizyakov
In Proc. All-Russian Sci. Conf. "Interaction of Elements of the Natural Environment in High-Latitude Conditions" [Vseros. nauch. konf. «Vzaimodeystvie elementov prirodnoy sredy v vysokosirotnykh usloviyakh»] (RF, Sochi, 25–28 September, 2019), RF, Moscow, IG RAN, 2019, pp. 39–41 (in Russian).
11. A.I. Kizyakov, I.D. Streletskaya, V.I. Grebenets
In Proc. American Geophysical Union (AGU) 2019 Fall Meeting (USA, CA, San Francisco, 9–13 December, 2019), USA, CA, San Francisco, AGU, 2019, C41D-1490. (<https://agu.confex.com/agu/fm19/meetingapp.cgi/Paper/489856>).
12. I. Streletskaya, A. Kizyakov, A. Vasiliev, G. Oblogov, D. Nekrasov
In Proc. Internat. Conf. "Solving the Puzzles from Cryosphere": Program, (RF, Pushchino, 15–18 April, 2019), RF, Pushchino, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science RAS, 2019, pp. 141–142 (in Russian).
13. Map of Genetic Types and Iciness of the Upper 10-meter Section of Permafrost Rocks of the West Siberian Plate. Scale 1:1,000,000 [Karta geneticheskikh tipov i l'distosti verkhney 10-metrovoy chasti razreza mnogoletnemerykh porod Zapadno-Sibirskoy plity. Masshtab 1:1 000 000], Ed. V.T. Trofimov, USSR, Voronezh, PGO "Tsentrgeologiya", 1982 (in Russian).
14. I.D. Streletskaya, M.O. Leibman, A.I. Kizyakov, G.E. Oblogov, A.A. Vasilev, A.V. Khomutov, Yu.A. Dvornikov
Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya [Moscow University Bulletin, Ser. 5, Geography], 2017, №2, 91 (in Russian).
15. A.I. Kizyakov, I.D. Streletskaya, V.I. Grebenets, Yu.B. Badu
In Proc. XIV All-Russian Sci. Pract. Conf. "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation" [Mat. dokl. XIV Obshcheros. nauch.-prakt. konf. "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskany v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii"] (RF, Moscow, 11–14 December, 2018), RF, Moscow, "Geomarketing" Publ. House, 2018, pp. 268–272 (in Russian).
16. A. Khomutov, M. Leibman, Y. Dvornikov, A. Gubarkov, D. Mullanurov, R. Khairullin
In Proc. 4th WLF 2017 "Advancing Culture of Living with Landslides", Eds. M. Mikoš, V. Vilimek, Y. Yin, K. Sassa, DE, Cham, Springer Int. Publ., 2017, pp. 209–216.
DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.
17. A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, E.Yu. Zhdanova
In Proc. XV All-Russian Sci. Pract. Conf. "Prospects for the Development of Engineering Surveys in Construction in the Russian Federation" [Mat. dokl. XV Obshcheros. nauch.-prakt. konf. "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskany v stroitelstve v Rossiyskoy Federatsii"] (RF, Moscow, 26–29 November, 2019), RF, Moscow, "Geomarketing" Publ. House, 2019, pp. 274–279 (in Russian).
18. F. Günther, A.I. Kizyakov, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin
In Proc. Int. Conf. "Patterns of Formation and Impact of Marine, Atmospheric Hazards and Catastrophes on the Coastal Zone of the Russian Federation in the Context of Global Climatic and Industrial Challenges (Hazardous Phenomena)" [Zakonomernosti formirovaniya i vozdeystvia morskikh, atmosferynykh opasnykh yavleniy i katastrof na pribrezhnuyu zonu RF v usloviyakh globalnykh klimaticheskikh i industrialnykh vyzovov (Opasnye yavleniya): Mat. Mezhdunar. konf.], (RF, Rostov-na-Donu, 13–23 June, 2019), RF, Rostov-na-Donu, RAS Southern Scientific Center Publ., pp. 221–222.
19. A.I. Kizyakov, F. Günther, M.V. Zimin, A.V. Sonyushkin, S. Wetterich
In Proc. 15th International Circumpolar Remote Sensing Symposium – Book of Abstracts (Germany, Potsdam, 10–14 September, 2018), Eds. F. Günther, G. Grosse, B.M. Jones, Germany, Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein. (https://epic.awi.de/id/eprint/48600/1/Coastal_destruction_in_the_western_and_eastern-most_occurrence_of_tabular_ground_ice_in_the_Eurasian_Arctic.pdf).
20. V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets
In Proc. AGU 100 Advanced Earth and Space Science 2018 Fall Meetings (USA, Washington, DC, 10–14 December, 2018), GC33E-1407. Publ. 12 Dec 2018. (<https://agu.confex.com/agu/fm18/meetingapp.cgi/Paper/377931>).
21. V.A. Tolmanov, V.I. Grebenets
In Proc. All-Russian Conf. "Interdisciplinary Scientific Research for the Development of Mountainous and Arctic Territories" [Tezisy dokl. vseros. konf. "Mezhdistsiplinarnye nauchnye issledovaniya v tselyakh osvoeniya gornyykh i arkticheskikh territoriy"] (RF, Sochi, 24–29 September, 2018), RF, Moscow, Publ. IG RAS & Glaciological Association, 2018, p. 24 (in Russian).
22. A. Kizyakov, M. Leibman, M. Zimin, A. Sonyushkin, Y. Dvornikov, A. Khomutov, D. Dhont, E. Cauquil, V. Pushkarev, Y. Stanilovskaya
Remote Sensing, 2020, 12(14), 2182. DOI: 10.3390/rs12142182.
23. Y.A. Dvornikov, M.O. Leibman, A.V. Khomutov, A.I. Kizyakov, P.B. Semenov, I. Busmann, E.M. Babkin, B. Heim, A. Portnov, E.A. Babkina, I.D. Streletskaya, A.A. Chetverova, A. Kozachek, H. Meyer
Permafrost and Periglacial Processes, 2019, 30(3), 146.
DOI: 10.1002/ppp.2014.
24. V.I. Grebenets, I.D. Streletskaya, A.I. Kizyakov
In Proc. All-Russian Sci. Conf. "Interaction of Elements of the Natural Environment in High-Latitude Conditions" [Tezisy dokl. Vseros. nauch. konf. "Vzaimodeystvie elementov prirodnoy sredy v vysokosirotnykh usloviyakh"] (RF, Sochi, 25–28 September 2019), RF, Moscow, Publ. IG RAS, 2019, p. 39 (in Russian).
25. V.I. Grebenets, V.A. Tolmanov
Ice and Snow J. [Led i sneg], 2021, 61(3), 457 (in Russian).
DOI: 10.31857/S2076673421030101.

26. V. Grebenets, V. Tolmanov, F. Iurov, P. Groisman
Environ. Res. Lett., 2021, **16**(10), 105007.
DOI: 10.1088/1748-9326/ac2375.
27. V.I. Grebenets, A.I. Kizyakov, A.A. Maslakov, S.A. Sokratov, I.D. Streletskaya, V.A. Tolmanov, F.D. Yurov
Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya [Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography], 2022, №2, 25 (in Russian).
28. N. Tumel, L. Zotova
Geosciences, 2019, **9**(8), 353. DOI: 10.3390/geosciences9080353.
29. A.A. Maslakov, K.E. Nyland, N.N. Komova, F.D. Yurov, K. Yoshikawa, G.N. Kraev
Geogr. Env. Sustain., 2020, **13**(3), 49.
DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
30. V.I. Grebenets, A.A. Najdenko, V.A. Tolmanov, A.G. Khajredinova, V.B. Pavlunin
In Proc. "Sergeev Readings. Geoecological Safety of the Development of Mineral Deposits", Iss. 19 (based on the mater. of the Annual Session of the RAS Scientific Council on the Problems of Geoecology, Engineering geology and Hydrogeology) [«Sergeevskie chtenia. Geokologicheskaya bezopasnost razrabotki mestorozhdeny poleznykh iskopaemykh», Vyp. 19 (po mat. godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geokologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii, RF, Moscow, 4-5 Apr., 2017)], RF, Moscow, RUDN Univ. Publ. House, 2017, pp. 448–453 (in Russian).