ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК: 551.34:624.139

ВЛИЯНИЕ ОПАСНЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ГОРОДОВ В АРКТИКЕ

В.И. Гребенец[1], А.И. Кизяков[2], А.А. Маслаков[3], С.А. Сократов[4], И.Д. Стрелецкая[5], В.А. Толманов[6], Ф.Д. Юров[7]

[1–7] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет*

[1] *Кафедра криолитологии и гляциологии, доц., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: vgreb@inbox.ru*
[2] *Кафедра криолитологии и гляциологии, вед. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: akizyakov@mail.ru*
[3] *Научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера, ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: alekseymaslakov@yandex.ru*
[4] *Кафедра криолитологии и гляциологии, доц., канд. геогр. наук; e-mail: sokratov@geogr.msu.ru*
[5] *Кафедра криолитологии и гляциологии, доц., канд. геол.-минер. наук; e-mail: irinastrelets@gmail.com*
[6] *Кафедра криолитологии и гляциологии, асп.; e-mail: vasiliytolmanov@gmail.com*
[7] *Кафедра криолитологии и гляциологии, мл. науч. сотр.; e-mail: fdiurov@gmail.com*

В статье подводится итог многолетних комплексных исследований влияния опасных криогенных процессов на инфраструктуру поселений Российской Арктики с оценкой степени деформированности объектов. Процент деформированности инженерной инфраструктуры варьирует от 20–25 до 75–80%, что часто вызвано развитием опасных криогенных процессов.

Оценка негативного воздействия наиболее деструктивных процессов была проведена в 37 поселениях Российской Арктики по разработанной методике, учитывающей три показателя проявления криогенных процессов: степень пораженности, продолжительность, повторяемость. Особую опасность представляют процессы, связанные с дополнительным отеплением мерзлоты через поверхность; наблюдается новый цикл активизации термоцирков, спровоцированный вытаиванием пластовых льдов. Темпы развитии термоденудации могут достигать 15 м/год. Установлена существенная роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния для термоэрозионных оврагов. Проанализирована возможность возникновения морозобойного растрескивания в природных условиях.

Проанализировано воздействие размещения отходов на инфраструктуру Арктики, осуществлена классификация (8 групп) по степени их влияния на вечномерзлые основания. Уделено внимание влиянию механизированного перераспределения снега на застроенных территориях на вечномерзлые основания; формирование мощных отвалов отепляет мерзлоту, активизирует опасные криогенные процессы.

Для городской застройки получены сведения о динамике температурного режима вечномерзлых грунтов оснований под зданиями с холодными проветриваемыми подпольями: для 60% оснований характерны тренды к деградации мерзлоты, для 20% – понижение температуры мерзлоты, 20% – сохранение стабильного природного состояния.

Установлено, что на хозяйственно освоенных территориях криолитозоны формируются особые природно-техногенные геокриологические комплексы, в пределах которых прослеживается особое сочетание криогенных процессов и фиксируется различная устойчивость инфраструктуры даже для однотипных объектов. Оценена эффективность основных методов управления мерзлотной обстановкой для обеспечения устойчивости инфраструктуры в Арктике.

Ключевые слова: Крайний Север, геокриологические опасности, интегральная оценка риска, здания и сооружения

ВВЕДЕНИЕ

В криолитозоне России сосредоточены основные природные ресурсы, без рационального освоения которых невозможно устойчивое развитие страны в XXI в.; велико геополитическое значение арктических регионов России.

Природная среда Арктики уязвима, особо чувствительна к изменениям климата, обусловленным естественными причинами и антропогенным воздействием, а ее реакция на эти колебания крайне динамична и разнонаправлена. Особым компонентом природной среды является вечная мерзлота,

выступающая также в качестве оснований зданий и сооружений. В условиях меняющегося климата [IPCC…, 2014] и с учетом региональных мерзлотно-литологических особенностей поверхностных отложений изучение опасных криогенных процессов выдвигается на передний план современных исследований в криолитозоне. Целью исследования является определение влияния опасных криогенных процессов на инфраструктуру в Арктике. Задачи – выявить процессы и явления (связанные с отеплением или охлаждением мерзлоты), которые будут наиболее активны в ближайшие 30–50 лет (нормативный период эксплуатации основных объектов хозяйственной инфраструктуры) в зависимости от трендов изменения климата в том или ином регионе Арктики, и исследовать их современную динамику; оценить интенсивность процессов (слабоинтенсивные, интенсивные, чрезвычайно интенсивные); провести анализ различных типов воздействий на вечную мерзлоту: тепловых, физико-химических, механических; провести районирование арктических территорий по потенциальной активизации опасных криогенных процессов на основании установленных закономерностей с учетом природных тенденций и усиления техногенной нагрузки; наметить методы управления мерзлотной обстановкой для повышения устойчивости инфраструктуры.

Возрастающие риски угрожают нормальной жизнедеятельности, приводят к увеличению затрат на строительство и обеспечение геотехнической безопасности, поэтому весьма актуальны с теоретической и практической точки зрения исследования влияния активизации опасных криогенных процессов на хозяйственное освоение Арктики.

Изменение состояния вечномерзлых пород и активизация криогенных процессов в ответ на климатические изменения – широко известный феномен [Гребенец, 2007; Кислов и др., 2011].

Увеличение глубины сезонного оттаивания, повышение температуры вечномерзлых пород (ВМП) и развитие опасных криогенных процессов наблюдаются во многих областях Арктики. Данные долгосрочных измерений температуры вечномерзлых пород [Romanovsky et al., 2017; Climate…, 2019] указывают на тренд к повышению температуры, нарастанию нестабильности верхних, зачастую льдистых горизонтов, что активизирует комплекс деструктивных процессов.

Деградация (сокращение мощности и/или площади) ВМП и сопутствующие ей проявления в рельефе связаны с активизацией широкого комплекса экзогенных, прежде всего криогенных, процессов.

Проявления термокарста среди процессов деградации мерзлоты в настоящее время находятся в центре внимания. Отмечается активация формирования термокарстовых озер в связи с потеплением климата. Среди публикаций последних лет большое количество статей посвящено рассмотрению динамики и особенностей развития термоэрозии в различных, в том числе и урбанизированных, регионах Арктики [Haltigin et al., 2012; Costard et al., 2014].

Высокие темпы отступания мерзлых берегов морей и рек, а в особенности сложенных высокольдистыми породами [Günther et al., 2015; Fuchs et al., 2020], представляют собой очевидную угрозу для прибрежных поселений и расположенной рядом хозяйственной инфраструктуры. Несмотря на достаточную изученность, значительные участки арктического побережья России не имеют количественных динамических оценок, подтвержденных непосредственными наблюдениями.

Из криогенных склоновых процессов, представляющих потенциальную опасность для объектов арктической инфраструктуры, следует выделить криогенные оползни [Лейбман, Кизяков, 2007]. В условиях распространения близких к поверхности залежеобразующих льдов опасность для хозяйственных объектов представляет высокая скорость отступания льдистых уступов термоцирков за счет термоденудации [Куницкий и др., 2013].

Новым и пока малоизученным процессом в Российской Арктике являются воронки газового выброса, проявившиеся на севере Западной Сибири [Leibman et al., 2014]. Это явление представляет собой несомненную угрозу поселкам и объектам инфраструктуры, поскольку до сих пор не удается сузить диапазон природных условий, в которых они могут проявиться, а также продолжительность жизненного цикла бугров-предшественников. Для инфраструктуры Арктики серьезную опасность представляют как неравномерные осадки грунтов при их оттаивании, так и морозное пучение, развивающееся в сезонно-талом слое (СТС).

Интенсивность опасных криогенных, связанных с дополнительными импульсами отепления и охлаждения грунтов, а также склоновых и специфических процессов (например, криогенного выветривания материалов подземных конструкций) существенно возрастает не только при повышении температуры наружного воздуха, но и при изменении условий снегонакопления [Гребенец и др., 2019]. Это зачастую вызывает снижение несущей способности фундаментов. Деградационные тенденции в мерзлых основаниях приводят к увеличению глубины СТС и, следовательно, к расширению зоны морозной деструкции подземных конструкций [Grebenets et al., 2002], а также к увеличению касательных сил криогенного пучения в промерзающем зимой СТС.

В настоящее время потребовалось решение ряда проблем, связанных с воздействием криосферных процессов на экосистемы и инфраструктуру Арктики, прежде всего учет региональных (секторных) различий в реакции процессов на изменение температуры и осадков, особенно снега, а также криолитологических параметров в разных областях Крайнего Севера. Важной задачей остается оценка реального состояния инфраструктуры, а также разработка эффективных методов повышения устойчивости объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации цели и задач исследования применялся анализ материалов собственных полевых наблюдений, а также методы обработки данных дистанционного зондирования, геоинформационное картографирование, статистический анализ полученных результатов, численное моделирование.

При проведении исследований были использованы разновременные архивные и современные материалы дистанционного зондирования (аэрофотоснимки и космические снимки). Их тематическое дешифрирование позволило установить проявления опасных процессов и определить особенности их географического распространения и тенденции развития во времени.

Численное моделирование температурных полей грунтов для определенных целей проводилось в программах «Тепло» или QFrost, разработанных на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ.

В ходе работы собраны сведения о современном состоянии инфраструктуры в Арктике, изучены научные публикации, фондовые материалы, проведены полевые («контрольные») наблюдения в крупнейших заполярных городах и поселках России. Проведены натурные исследования по выявлению негативных изменений в инфраструктуре по двум направлениям: а) фиксация интенсивности проявления процессов, связанных как с дополнительным охлаждением или отеплением, так и с усилением гравитационной нестабильности оттаивающих и высокотемпературных мерзлых грунтов; б) натурные исследования деструкции (криогенного выветривания) надземных и подземных частей конструкций. Состояние объектов оценивалось визуально по наличию трещин, провалов и других деформаций конструкций зданий и сооружений. В отдельных случаях изучались фондовые материалы отделов технического надзора, геокриологических служб и ряда других организаций. Степень деформированности принята как отношение имеющих повреждения (в том числе отклонения от проектных режимов) объектов к общему числу зданий и сооружений. Из анализа были исключены авто- и железные дороги и трубопроводы различного назначения.

Для расчета интегральной оценки риска был произведен выбор наиболее опасных для поселений Севера криогенных процессов: морозобойное растрескивание, наледи, морозное пучение, склоновые движения, термоэрозия и термоабразия берегов, термокарст. По результатам полевых наблюдений, изучения литературных и фондовых источников, а также при анализе космоснимков разного разрешения были оценены степень пораженности территории муниципальных образований (для небольших населенных пунктов в радиусе 8–10 км), продолжительности воздействия процесса и вероятности проявления (раз в 10–20 лет). Степень пораженности, повторяемость и продолжительность оценивались величиной от 0 до 1. Отсутствие проявлений процесса принималось равной 0. Пораженность измерялась как доля числа 1, например, если термокарст занимал 15% исследуемой территории, то этот показатель оценивался равным 0,15. Продолжительность (доли единицы) измерялась соотношением длительности (в месяцах) в годовом цикле проявления того или иного процесса к 12 месяцам. Анализ повторяемости является более сложным показателем: при ежегодном проявлении процесса он принимался равным 1; при развитии раз в 5 лет – 0,2; при развитии раз в 10 лет – 0,1 и т. п. Перемножением этих показателей получалась интегральная величина (от 0 до 1), характеризующая степень риска [Айбулатов и др., 2021]. Далее для каждого криогенного процесса проводилось разделение на шесть групп по степени опасности для инфраструктуры, каждой из которых присваивался балл: 1 – при низкой степени, 2 – при средней, 3 – при повышенной, 4 – при высокой, 5 – при чрезвычайно высокой, 6 – при максимальной. Сумма этих баллов для каждого населенного пункта позволяла получить обобщающий показатель – интегральную оценку риска от развития криогенных процессов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается нарастание деформаций в регионах Крайнего Севера, связанных как с климатическими изменениями, так и с хозяйственным освоением.

Экзогенные процессы в криолитозоне редко развиваются отдельно, а обычно образуют так называемые парагенетические ряды или комплексы. Наибольшую опасность представляют термокарст, термоэрозия, криогенные склоновые процессы, пучение, морозобойное растрескивание, воронки газового выброса [Стрелецкая и др., 2017; Кизяков и др., 2018].

Рост годовых сумм положительных температур наружного воздуха активизирует термоденудацию, например, в условиях залегающих вблизи поверхности подземных льдов на полуострове Ямал наблюдается интенсивное формирование термоцирков, связанных с вытаиванием пластовых льдов [Khomutov et al., 2017]. Появляются новые термоцирки, а для стабилизировавшихся прежде форм отмечается новый цикл активизации с 2012 г.

В результате анализа серии разновременных космических снимков выявлена современная динамика берегов и термоцирков на побережье о. Колгуев [Günther et al., 2019]. В 2002–2012 гг. темпы термоабразии 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, достигающие 15,1 м/год, отмечены в 2009–2012 гг. [Кизяков и др., 2019].

Одним из наиболее опасных процессов для конструкций на Крайнем Севере является морозобойное растрескивание. Интенсивность этого процесса можно оценить через так называемые «удары холода»; на рисунке 1 приведены результаты расчетов этого явления. Картосхема показывает 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 последние 18 лет (2000–2018) 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.).

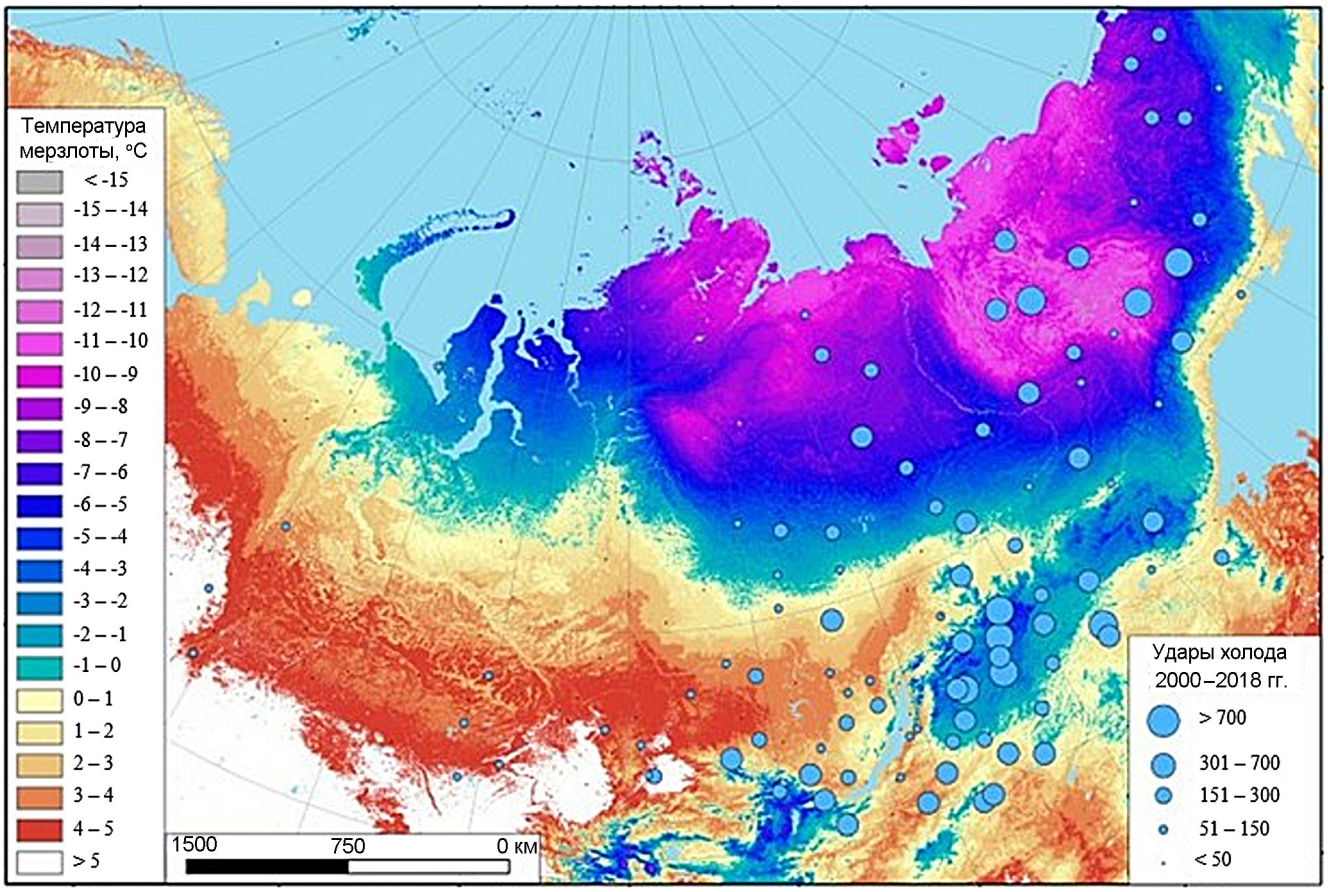

Рис. 1. Распространение суммарного числа «ударов холода» в 2000–2018 гг.
Карта мерзлоты Северного полушария использована в качестве подложки [Obu et al., 2019]

Fig. 1. Distribution of the sum of "cold hits" during 2000–2018.
Northern Hemisphere permafrost map used as a layout [Obu et al., 2019]

Исследования выявили интенсивное развитие деструктивных криогенных процессов на севере Западной Сибири. Следует отметить, прежде всего, угрозы, связанные с воронками газовых выбросов, термоэрозией и термоабразией берегов, криогенными оползнями [Grebenets et al., 2019b]. Полевые наблюдения и анализ данных дистанционного зондирования показали приуроченность воронок выбросов к определенным геолого-геоморфологическим условиям, позволили оценить их масштаб: от 25 до 37 м в диаметре на поверхности [Kizyakov et al., 2020]. При исследовании термоэрозии установлена значительная роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния, а также выявлена существенная активизация разрушения берегов в конце теплого периода: совпадение максимума атмосферных осадков и наибольшей глубины сезонного оттаивания [Tolmanov, 2020].

Для о. Колгуев отмечается рост годовых сумм положительных температур воздуха, при этом изменения продолжительности динамически активного периода не выявлены [Кизяков и др., 2019]. Темпы термоденудации (отступания стенок термоцирков с вскрывающимися пластовыми льдами) определяются, главным образом, суммой положительных значений температуры воздуха. Морская абразия не оказывает значительного влияния на динамику роста термоцирков, врезанных в бровку высоких уступов на удалении 100–300 м от береговой линии. Важнейшим фактором, определяющим скорость термоабразии, является продолжительность динамически активного периода, которая остается стабильной.

Совокупность криогенных процессов вызывает нестабильность в основаниях зданий и сооружений; безусловно, большую роль в надежности инженерной инфраструктуры в Арктике играют социально-экономические причины, анализ которых не является предметом исследования.

В 2018–2020 гг. проведены полевые обследования, а также анализ региональных фондовых документов для оценки реального состояния зданий и сооружений в ряде арктических городов: Воркуте, Харпе, Салехарде, Лабытнанги, Дудинке, Норильске, Батагае и др. В национальных поселках Заполярья практически все здания и системы жизнеобеспечения находятся в критическом (аварийном или предаварийном) состоянии, в крупных городах процент деформированности инженерной инфраструктуры варьирует от 20–25 до 75–80% (рис. 2). Основной причиной «неблагополучия» является развитие опасных криогенных процессов, спровоцированных в 80–85% случаев негативными техногенными воздействиями, в 15–20% – потеплением климата или локальными природными изменениями рельефа. Для городской застройки получены реальные сведения о динамике температурного режима вечномерзлых грунтов оснований под зданиями с холодными проветриваемыми подпольями: для 60% оснований характерны тренды к деградации мерзлоты, для 20% – понижение температуры мерзлоты, для 20% – сохранение стабильного природного состояния [Grebenets et al., 2019a]. Следует отметить, что несущая способность вмороженных фундаментов зависит, главным образом, от сил смерзания боковых поверхностей с вечномерзлыми грунтами, которые снижаются при повышении температуры мерзлоты, а увеличение глубины СТС уменьшает первоначальную площадь смерзания. Именно эта ситуация является основной причиной неудовлетворительного состояния инфраструктуры в Арктике.

Для 37 муниципальных образований Арктики были выполнены специальные количественные оценки для шести наиболее деструктивных криогенных процессов (термокарст, термоэрозия и термоабразия, криогенные оползни и движение каменных глетчеров, морозное пучение, морозобойное растрескивание, наледеобразование). Интегральная оценка риска от развития криогенных процессов для инфраструктуры изменялась от 11 (Тарко-Сале) до 28 баллов (Норильск). Данный подход позволил распределить поселения по трем группам: а) с максимальной вероятностью поражения застроенных территорий опасными криогенными процессами (Билибино, Хатанга и др.); б) со средней степенью угрозы для объектов (Воркута, Игарка и др.); в) с умеренной степенью риска для инфраструктуры (Лабытнанги, Анадырь и др.). Для городской застройки в городах Лабытнанги, Пангоды, а также для небольших национальных поселков Ямала отмечен чрезвычайно высокий уровень (от 50 до 80–90%) нарушений в эксплуатации холодных проветриваемых подполий, что вызывает деградацию вечной мерзлоты. Натурные обследования (поквартальный обход) 2018–2019 гг. в Лабытнанги показали, что в зависимости от активности этих процессов, а также от срока эксплуатации в отдельных микрорайонах фиксируется 70–80% деформированных объектов.

Важнейшим элементом национальных поселений арктической зоны России является устройство и эксплуатация ле́дников – уникальных подземных хранилищ мяса, рыбы и др.

Анализ температурного режима внутри ле́дников ряда поселений Чукотки показал, что на фоне повышения температуры наружного воздуха (3,8–4,4°С за последние 30 лет) из почти десятка построенных ранее ле́дников сохранилось и эксплуатируется не более 20% [Maslakov et al., 2020]. Особо чувствительны к климатическим изменениям также гидротехнические сооружения, в том числе земляные плотины с мерзлым ядром в небольших поселениях Арктики.

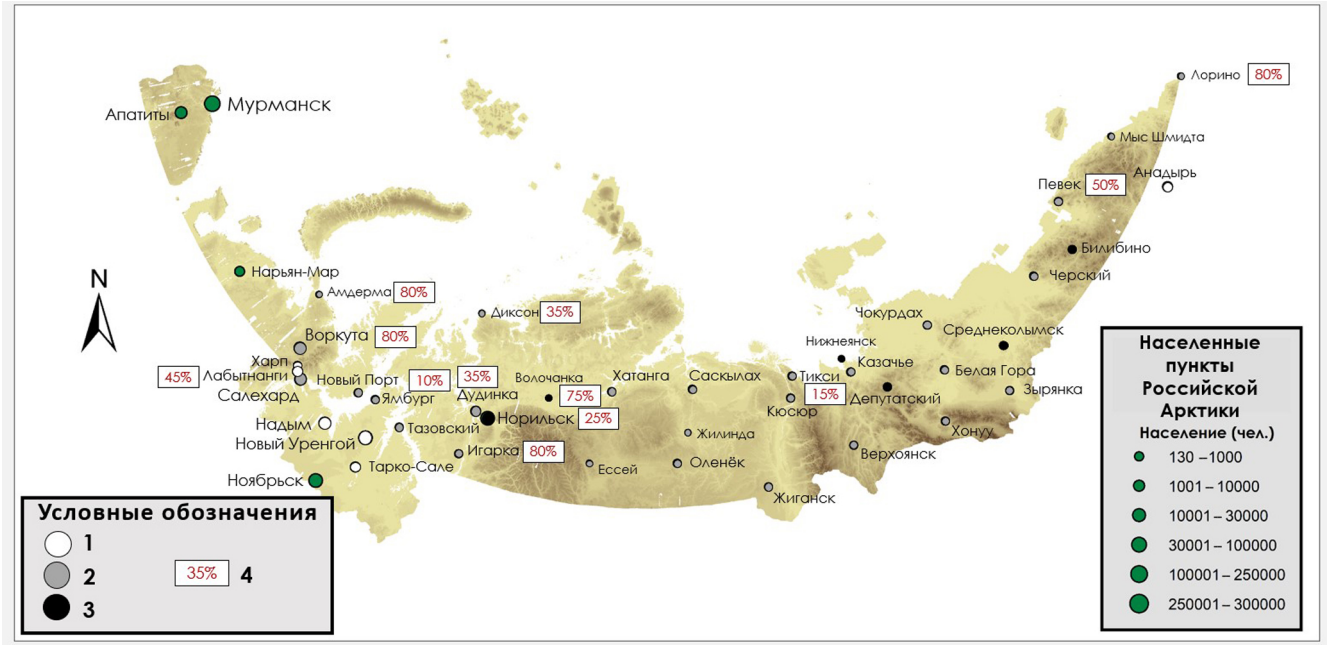

Рис. 2. Оценка степени деформированности объектов инфраструктуры при активизации опасных криогенных процессов: 1 – умеренная; 2 – средняя; 3 – максимальная; 4 – количество (в процентах) деформированных объектов по состоянию на второе десятилетие XXI в., %

Fig. 2. Degree of infrastructure deformation resulting from the intensification of hazardous cryogenic processes. Legend: Assessment of the degree of infrastructure deformation resulting from the intensification of hazardous cryogenic processes: 1 – moderate; 2 – medium; 3 – maximal; 4 – the share of deformed engineering objects in the settlements by the second decade of the 21st century, %

Особое воздействие на вечномерзлые основания объектов в Арктике оказывает механизированное перераспределение снежных отложений. В конце зимнего сезона в 2019 г. были проведены снегомерная съемка и картирование отвалов на селитебной территории Норильска, а также последующий анализ данных и сравнение нынешней ситуации с архивными данными 1987 г. Всего на карту было нанесено более 600 отвалов высотой от 2,5 до 5 м. Установлено, что их мощность может в 8–10 раз превышать естественную в тундре.

Моделирование теплового режима грунтов (на уровне нулевых сезонных колебаний – 10–12 м) показало, что при увеличении толщины снега в интервале от 0 до 2 м идет заметное повышение температуры по глубине (отепляющий эффект составляет 2,8°С за 30 лет при расчете для района Норильска). Снегоотвалы в городах распространены практически повсеместно, существуют каждую зиму на одних и тех же местах, что повышает температуру вечной мерзлоты под зданиями и сооружениями и, следовательно, снижает несущую способность вмороженных фундаментов; в период снеготаяния происходит переобводнение и подтопление территории города [Гребенец и др., 2019]. При механизированном перемещении снежного покрова процессы перекристаллизации снега также перестают соответствовать их естественной смене, а значит, нарушается установленная ранее [Sokratov, Barry, 2002] стадийность во влиянии естественного снежного покрова на тепловой режим подстилающего мерзлого грунта. Изменение физических характеристик снега влияет на интенсивность промерзания СТС.

Особую проблему представляет складирование бытовых и промышленных отходов на рельеф, что оказывает значительное механическое, физико-химическое, силовое и тепловое воздействие на вечную мерзлоту. Характерно, что при расширении поселений застройка производится на площадках, где ранее размещались отходы. Ухудшение инженерно-мерзлотных параметров явилось причиной массовых деформаций в северо-восточной части Норильска, где после 10–20 лет эксплуатации было снесено около 40 пяти- и девятиэтажных зданий, возведенных на подобной территории. Нами выделено восемь основных типов складирования отходов: 1) хранилища промышленных отходов (шлако-, шламо- и хвостохранилища, золоотвалы и др.), фактически уничтожающие мерзлоту; 2) складирование «пустой» породы, на склонах превращающейся в подвижные техногенные каменные глетчеры; 3) мусороотвалы (бытовые отходы), отепляющие и засоляющие грунты, вызывающие деградацию мерзлоты; 4) отходы лесопереработки, горение и

гниение которых активизирует криогенные процессы и вызывает формирование таликовых участков; 5) заброшенные поселки или микрорайоны; 6) свалки бочек, содержащих остатки горюче-смазочных веществ, при коррозии бочек проникающих в грунты, что приводит к засолению и изменению теплофизических свойств; 7) резервуарные парки для хранения нефтепродуктов, где деформации емкостей при активизации криогенных процессов вызывают коренное преобразование ландшафтно-мерзлотных условий; 8) зоны складирования снега, вывозимого с застроенных территорий, содержащего загрязнители, которые, проникая в СТС, изменяют физико-химические параметры грунтов.

Геоэкологическая и геотехническая ситуации в индустриальных центрах криолитозоны осложняются проблемой попадания различных загрязнителей в сезонно-талый слой и последующим их проникновением в мерзлую толщу, в которую вморожены фундаменты. Наши исследования показали, что содержание легкорастворимых солей в пределах тундровых ландшафтов многократно меньше, чем на индустриально освоенных территориях (рис. 3). Следует добавить, что эти легкорастворимые соли агрессивно воздействуют на материалы подземных конструкций.

На территориях населенных пунктов Арктики при совместном воздействии природных и антропогенных факторов происходит формирование специфических природно-техногенных геокриологических комплексов. В зависимости от вида, интенсивности и длительности техногенных воздействий, а также от климатических, ландшафтных и природных литокриогенных условий возникают различные комбинации комплексов, сочетания опасных криогенных процессов. Наши наблюдения позволили выделить 17 типов подобных комплексов в Норильском промышленном районе, 5 – в Анадыре, 7 – на территории Ямбургского газоконденсатного месторождения, 13 – в Игарке, 32 типа комплексов, формирующихся вдоль надземных и подземных трубопроводов в криолитозоне, и др. Влияние опасных криогенных процессов на инфраструктуру проявляется по-разному. Например, на территории современной городской застройки в пос. Ямбург, где возведены и эксплуатируются здания с эффективно функционирующими холодными проветриваемыми подпольями и отлаженной системой водоотведения, опасные процессы фактически отсутствуют. Однако, в микрорайонах раннего освоения (1980-е гг.) наблюдаются тенденции к деградации мерзлоты, активны термокарст и термоэрозия, тепловые осадки частей зданий, выпучивание столбов оград и т. д.

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 [Гребенец, Рогов, 2000]: а) укрепление мерзлоты, повышение ее несущей способности, сокращение деятельного слоя (зоны воздействия касательных сил морозного пучения); б) протаивание в южной криолитозоне линз или маломощных высокотемпературных слоев мерзлоты; в) сохранение status-quo для вечномерзлых оснований существующих объектов.

Могут применяться как «пассивные» (направлены на изменение условий внешнего теплообмена в системе «грунт – поверхность – атмосфера»), так и

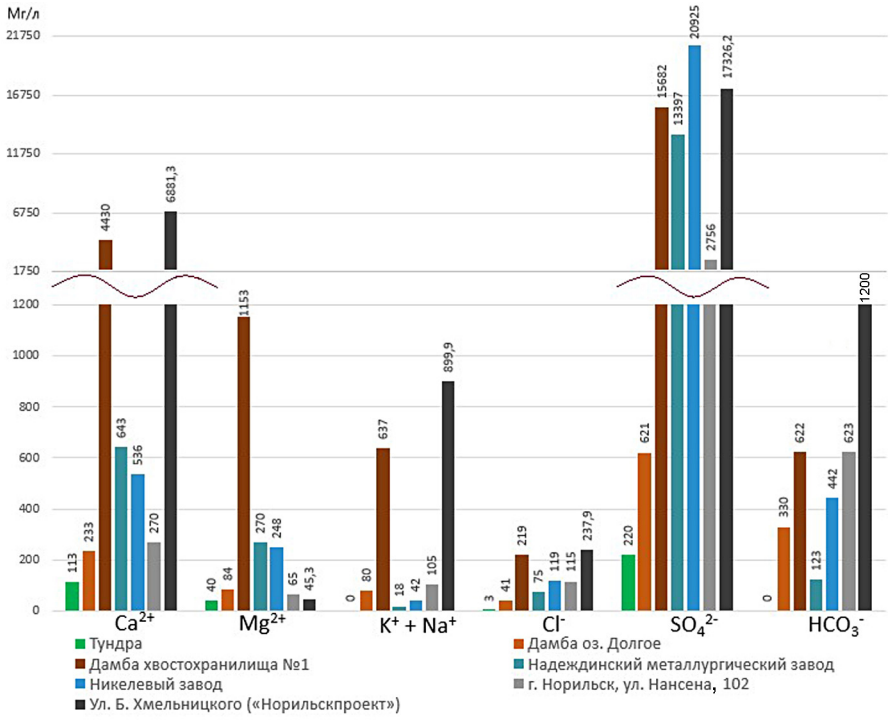

Рис. 3. Содержание легкорастворимых солей в активном слое на территории Норильского промышленного региона

Fig. 3. Concentration of soluble salts in the active layer within the Norilsk industrial region

«активные» методы (воздействие на грунты по их глубине). Для Арктической зоны России наиболее актуальны методы, направленные на укрепление мерзлоты.

К «пассивным» методам можно отнести: а) оптимизацию застройки, ее уплотнение за счет возведения зданий с эффективно действующими холодными проветриваемыми подпольями; б) водоотведение; в) организацию и обустройство мест складирования отходов; г) систематическую снегоочистку территорий; д) утепление 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%.

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

ВЫВОДЫ

Выполнены комплексные исследования состояния инфраструктуры в поселениях Российской Арктики с оценкой степени деформированности объектов, в результате которых:

– создана сводная база данных;

– установлено, что в районах с вечной мерзлотой в урбанизированной среде развивается ряд опасных для инфраструктуры инженерно-криогенных процессов, которые спровоцированы (или активизированы) под техногенным воздействием на территориях Арктики, где в природных условиях они практически не встречаются. Активизируются термокарст, термоэрозия и термоабразия берегов, наледеобразование, а в связи с увеличением деятельного слоя – и касательные силы морозного пучения;

– выявлено, что практически все здания и системы жизнеобеспечения на территории национальных поселков Заполярья находятся в аварийном или предаварийном состоянии, в индустриальных центрах процент деформированности инженерной инфраструктуры варьирует от 20–25 до 75–80%, что часто вызвано развитием опасных криогенных процессов;

– для оценки негативного воздействия наиболее деструктивных процессов (шесть групп: термокарст, термоэрозия и термоабразия, криогенные оползни и движение каменных глетчеров, морозное пучение, морозобойное растрескивание, наледеобразование) на инфраструктуру населенных пунктов была разработана методика, учитывающая три показателя проявления криогенных процессов: степень пораженности, продолжительность, повторяемость. Оценка риска была проведена в 37 поселениях Российской Арктики. При этом особое внимание было уделено инфраструктуре севера Западной Сибири [Толманов и др., 2019];

– выявлено, что опасность представляют процессы, связанные с дополнительным отеплением поверхности; по полученным данным, в западной части Арктики наблюдается новый цикл активизации термоцирков, связанных с вытаиванием пластовых льдов. Темпы развития термоденудации могут достигать 15 м/год; установлена высокая роль блокового обрушения мерзлых массивов в период снеготаяния для термоэрозионных оврагов;

– проанализированы возможность возникновения и активность морозобойного растрескивания в природных условиях в современных метеорологических условиях; установлено, что за последние 18 лет активнее всего этот процесс протекает в континентальных районах Сибири (Забайкальский край, Бурятия, Магаданская область и т. п.), однако он развивается и на территории Арктической части зоны распространения вечной мерзлоты;

– проанализировано воздействие на инфраструктуру Арктики размещения отходов, осуществлена классификация (восемь групп) по степени их влияния на вечномерзлые основания;

– особое внимание уделено влиянию на вечномерзлые основания механизированного перераспределения снега на застроенных территориях; формирование мощных отвалов отепляет мерзлоту, активизирует опасные криогенные процессы;

– установлено, что на хозяйственно освоенных территориях криолитозоны формируются особые природно-техногенные геокриологические комплексы, в пределах которых прослеживается особое сочетание криогенных процессов и фиксируется различная устойчивость инфраструктуры даже для однотипных объектов;

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

Благодарности. Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 18-06-60080 «Опасные нивально-гляциальные и криогенные процессы и их влияние на инфраструктуру в Арктике».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Айбулатов Д.Н., Глазовская Т.Г., Гребенец В.И., Деркачева А.А., Сократов С.А., Толманов В.А., Турчанинова А.С., Хисматуллин Т.И., Школьный Д.И., Шныпарков А.Л. Развитие транспортных сетей Сибири и Дальнего Востока с учетом опасных природных процессов и явлений. М.: Перо, 2021. 200 с.

Гребенец В.И. Негативные последствия деградации мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2007. № 3. С. 18–21.

Гребенец В.И., Рогов В.В. Инженерное мерзлотоведение: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 2000. 96 с.

Гребенец В.И., Толманов В.А., Федин В.А. Влияние механизированного перераспределения снега на вечномерзлые основания в городах Арктики // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26–29 ноября 2019 г. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 248–252.

Кизяков А.И., Гюнтер Ф., Зимин М.В., Сонюшкин А.В., Жданова Е.Ю. Разрушение берегов острова Колгуев в условиях распространения пластовых льдов // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», г. Москва, 26–29 ноября 2019 г. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 274–279.

Кизяков А.И., Стрелецкая И.Д., Гребенец В.И., Баду Ю.Б. Активизация опасных природных процессов в районах распространения крупных залежей подземных льдов в условиях меняющегося климата Арктики // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ: материалы XIV Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2018. С. 268–272.

Кислов А.В., Гребенец В.И., Евстигнеев В.М., Конищев В.Н., Сидорова М.В., Суркова Г.В., Тумель Н.В. Последствия возможного потепления климата в XXI веке на севере Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2011. № 3. С. 3–8.

Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н. Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. XVII. № 1. С. 56–68.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. ИКЗ СО РАН, М.; Тюмень, 2007. 206 с.

Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О., Кизяков А.И., Облогов Г.Е., Васильев А.А., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2017. № 2. С. 91–99.

Толманов В.А., Гребенец В.И., Юров Ф.Д. Оценка негативного влияния криогенных процессов на инфраструктуру ЯНАО // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», Москва, 26–29 ноября 2019 г. М.: Геомаркетинг, 2019. С. 284–290.

Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation (The Norwegian Centre for Climate Services (NCCS) report, 2019, no. 1 / I. Hanssen-Bauer, E.J. Førland, H. Hisdal, S. Mayer, A.B. Sandø, A. Sorteberg (eds.), Oslo, NCCS, 2019, 206 p.

Costard F., Gautier E., Fedorov A., Konstantinov P., Dupeyrat L. An Assessment of the Erosion Potential of the Fluvial Thermal Process during Ice Breakups of the Lena River (Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, vol. 25, no. 3, p. 162–171, DOI: 10.1002/ppp.1812.

Fuchs M., Nitze I., Strauss J., Günther F., Wetterich S., Kizyakov A., Fritz M., Opel T., Grigoriev M.N., Maksimov G.T. Grosse G. Rapid Fluvio-Thermal Erosion of a Yedoma Permafrost Cliff in the Lena River Delta, *Frontiers in Earth Science*, 2020, no. 8, p. 336, DOI: 10.3389/feart.2020.00336.

Grebenets V., Tolmanov V., Iurov F. Influence of engineering-cryogenic processes on the infrastructure of the Arctic due to climatic changes and increasing anthropogenic impact, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2019, GC21E-1276, San Francisco, CA, 2019a.

Grebenets V.I., Kizyakov A.I., Streletskaya I.D. Hazardous permafrost processes in areas with massive ground ice occurrence in the Western Russian Arctic, American Geophysical Union (AGU), Fall Meeting 2019, C41D-1490, San Francisco, CA, 2019b.

Grebenets V.I., Konishchev V.N., Rogov V.V. Cryogenic destruction of construction materials in foundations of buildings erected in the permafrost zone, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2002, vol. 39, no. 3, p. 106–111, DOI: 10.1023/A:1020372002621.

Günther F., Kizyakov A.I., Zimin M.V., Sonyushkin A.V. Destruction of coasts with tabular ground ice occurrence on Kolguev Island, European Russian Arctic // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов («Опасные явления»): материалы Международной научной конференции, г. Ростов-на-Дону, 13–23 июня 2019 г. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. С. 221–222.

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, vol. 9, no. 1, p. 151–178, DOI: 10.5194/tc-9-151-2015.

Haltigin T.W., Pollard W.H., Dutilleul P., Osinski G.R. Geometric evolution of polygonal terrain networks in the Canadian High Arctic: Evidence of increasing regularity over time, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, vol. 23, no. 3, p. 178–186, DOI: 10.1002/ppp.1741.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations, *Advancing Culture of Living with Landslides*, Proceedings of World Landslide Forum 4, May 29 – June 2, 2017, Ljubljana, Slovenia,

vol. 5, Landslides in Different Environments, K. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa (eds.), Springer International Publishing AG, 2017, p. 209–216, DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.

Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E., Pushkarev V., Stanilovskaya Y. Gas emission craters and mound-predecessors in the north of West Siberia, similarities and differences, *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 4, 2182, DOI: 10.3390/rs12142182.

Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature – deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations, *Geography, Environment, Sustainability*, 2014, vol. 7, no. 4, p. 68–79, DOI: 10.24057/2071-9388-2014-7-4-68-79.

Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N., Yurov F.D., Yoshikawa K., Kraev G.N. Community ice cellars in Eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 3, p. 49–56, DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.

Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.N., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmoeller B., Kholodov A., Khomutov A., Kaab A., Leibman M.O., Lewkowicz A.G., Panda S.K., Romanovsky V., Way R.G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km^2 scale, *Earth Science Reviews*, 2019, vol. 193, p. 299–316, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A., Shiklomanov N., Smith S., Walker D. Changing permafrost and its impacts, *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*, Oslo, Norway, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017, p. 65–102.

Sokratov S.A., Barry R.G. Intraseasonal variation in the thermoinsulation effect of snow cover on soil temperatures and energy balance, *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. D9–D10, 13 p., DOI: 10.1029/2001JD000489.

Tolmanov V. Thermoerosion process on Tazovskiy peninsula. Factors and dynamics, *European Geosciences Union General Assembly 2020,* Geophysical Research Abstracts, vol. 22, Vienna, Austria, 2020, EGU2020-825, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-825.

Поступила в редакцию 16.03.2021
После доработки 18.08.2021
Принята к публикации 27.09.2021

IMPACT OF HAZARDOUS CRYOGENIC PROCESSES ON URBAN INFRASTRUCTURE IN THE ARCTIC

V.I. Grebenets[1], A.I. Kizyakov[2], A.A. Maslakov[3], S.A. Sokratov[4], I.D. Streletskaya[5], V.A. Tolmanov[6], F.D. Yurov[7]

[1–7] *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography*

[1] *Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: vgreb@inbox.ru*
[2] *Department of Cryolithology and Glaciology, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: akizyakov@mail.ru*
[3] *Research Laboratory of Geoecology of the Northern Territories, Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: alekseymaslakov@yandex.ru*
[4] *Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: sokratov@geogr.msu.ru*
[5] *Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, Ph.D. in Geology and Mineralogy; e-mail: irinastrelets@gmail.com*
[6] *Department of Cryolithology and Glaciology, post-graduate student; e-mail: vasiliytolmanov@gmail.com*
[7] *Department of Cryolithology and Glaciology, Junior Scientific Researcher; e-mail: fdiurov@gmail.com*

The article summarizes long-term comprehensive studies of the impact of hazardous cryogenic processes on the infrastructure of settlements in the Russian Arctic with the assessment of the degree of deformation of the engineering objects. The percentage of deformed engineering infrastructure varies from 20–25 to 75–80%, often as a result of the development of dangerous cryogenic processes.

The negative impact of the most destructive processes was assessed for 37 settlements of the Russian Arctic. Suggested methodology includes three main indicators of cryogenic processes, i.e. degree of damage, duration and frequency. The processes associated with additional warming of the surface are the most dangerous. A new cycle of thaw slumps activation, associated with the thawing of ground ice and ice-bearing permafrost is observed. The rate of thermal denudation could be up to 15 m/year. The important feature in the gully development is block collapse of permafrost grounds during the snowmelt period. The possibility of frost cracking under natural conditions was estimated.

The impact of waste disposal on the Arctic infrastructure was also analyzed. All wastes were classified into 8 groups based on the degree of their impact on frozen basements. Special emphasis was made on how the

mechanized redistribution of snow in urban areas influences frozen basements. The formation of large snow dumps affects permafrost and activates hazardous cryogenic processes.

Information on the temperature regime dynamics was obtained for frozen basements of buildings in urban areas: permafrost degradation was detected in 60% of basements; permafrost temperature decrease in 20% of basements; and the stable state of permafrost in 20%.

It was revealed that specific natural and geotechnical geocryological complexes are formed within economically developed territories in the permafrost zone. Special combinations of cryogenic processes for each complex were found and different stability could be a feature of even similar engineering objects. Effectiveness of the principal methods of permafrost management to ensure the stability of infrastructure was estimated.

Keywords: the Far North, cryogenic hazards, integral risk assessment, buildings and constructions

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project number 18-06-60080 Hazardous nival-glacial and cryogenic processes and their impact on infrastructure in the Arctic).

REFERENCES

Aibulatov D.N., Glazovskaya T.G., Grebenets V.I., Derkacheva A.A., Sokratov S.A., Tolmanov V.A., Turchaninova A.S., Khismatullin T.I., Schkolny D.I., Schnyparkov A.L. *Development of transportation network in Eastern Siberia and the Russian Far East taking into account dangerous natural processes and phenomena*, Moscow, Pero Publ., 2021, 200 p. (In Russian)

Climate in Svalbard 2100 – a knowledge base for climate adaptation (The Norwegian Centre for Climate Services (NCCS) report, 2019, no. 1), I. Hanssen-Bauer, E.J. Førland, H. Hisdal, S. Mayer, A.B. Sandø, A. Sorteberg (eds.), Oslo, NCCS, 2019, 206 p.

Costard F., Gautier E., Fedorov A., Konstantinov P., Dupeyrat L. An Assessment of the Erosion Potential of the Fluvial Thermal Process during Ice Breakups of the Lena River (Siberia), *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, vol. 25, no. 3, p. 162–171, DOI: 10.1002/ppp.1812.

Fuchs M., Nitze I., Strauss J., Günther F., Wetterich S., Kizyakov A., Fritz M., Opel T., Grigoriev M.N., Maksimov G.T. Grosse G. Rapid Fluvio-Thermal Erosion of a Yedoma Permafrost Cliff in the Lena River Delta, *Frontiers in Earth Science,* 2020, no. 8, 336, DOI: 10.3389/feart.2020.00336.

Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Fedin V.A. [Impact of mechanized snow redistribution on permafrost foundations in Arctic cities], *Materialy dokladov XV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii"* [Materials of the reports at the XV All-Russian scientific-practical conference and exhibition "Prospects of the development of engineering surveys for construction in the Russian Federation"], Moscow, Geomarketing Publ., 2019, p. 248–252. (In Russian)

Grebenets V., Tolmanov V., Iurov F. Influence of engineering-cryogenic processes on the infrastructure of the Arctic due to climatic changes and increasing anthropogenic impact, *American Geophysical Union (AGU), Fall Meeting 2019*, GC21E-1276, San Francisco, CA, 2019a.

Grebenets V.I. Negativnye posledstviya degradatsii merzloty [Negative consequences of permafrost degradation], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2007, no. 3, p. 18–21. (In Russian)

Grebenets V.I., Kizyakov A.I., Streletskaya I.D. Hazardous permafrost processes in areas with massive ground ice occurrence in the Western Russian Arctic, *American Geophysical Union (AGU)*, Fall Meeting 2019, C41D-1490, San Francisco, CA, 2019b.

Grebenets V.I., Konishchev V.N., Rogov V.V. Cryogenic destruction of construction materials in foundations of buildings erected in the permafrost zone, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2002, vol. 39, no. 3, p. 106–111, DOI: 10.1023/A:1020372002621.

Grebenets V.I., Rogov V.V. *Inzhenernoe merzlotovedenie*. *Uchebnoe posobie* [Engineering permafrost studies: Textbook], Moscow, Lomonosov Moscow St. un-ty Publ., 2000, 96 p. (In Russian)

Günther F., Kizyakov A.I., Zimin M.V., Sonyushkin A.V. Destruction of coasts with tabular ground ice occurrence on Kolguev Island, European Russian Arctic, *Regularities of Formation and Impact of Marine and Atmospheric Hazardous Phenomena and Disasters on the Coastal Zone of the Russian Federation under the Conditions of Global Climatic and Industrial Challenges ("Dangerous Phenomena"): Proceedings of the International Scientific Conference*, *Rostov-on-Don, 13–23 June 2019*, Rostov-on-Don, SSC RAS Publ., 2019, p. 221–222.

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, vol. 9, no. 1, p. 151–178, DOI: 10.5194/tc-9-151-2015.

Haltigin T.W., Pollard W.H., Dutilleul P., Osinski G.R. Geometric evolution of polygonal terrain networks in the canadian high arctic: evidence of increasing regularity over time, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2012, vol. 23, no. 3, p. 178–186, DOI: 10.1002/ppp.1741.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations, *Advancing Culture of Living with Landslides, Proceedings of World Landslide Forum 4, May 29 – June 2, 2017, Ljubljana, Slovenia,* K. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa (eds.), vol. 5, Landslides in Different Environments, Springer International Publishing AG, 2017, p. 209–216, DOI: 10.1007/978-3-319-53483-1_24.

Kislov A.V., Grebenets V.I., Evstigneev V.M., Konishchev V.N., Sidorova M.V., Surkova G.V., Tumel' N.V. Posledstviya vozmozhnogo potepleniya klimata v XXI veke na severe Evrazii [Effects of possible climate warming in the 21st century for Northern Eurasia], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2011, no. 3, p. 3–8. (In Russian)

Kizyakov A.I., Streletskaya I.D., Grebenets V.I., Badu Yu.B. [Activation of hazardous natural processes in the areas of large deposits of underground ice under changing climate of the Arctic], *Materialy dokladov XIV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii"* [Materials of the reports at the XIV All-Russian scientific-practical conference and exhibition "Prospects of the development of engineering surveys for construction in the Russian Federation"], Moscow, Geomarketing Publ., 2018, p. 268–272. (In Russian)

Kizyakov A., Leibman M., Zimin M., Sonyushkin A., Dvornikov Y., Khomutov A., Dhont D., Cauquil E., Pushkarev V., Stanilovskaya Y. Gas emission craters and mound-predecessors in the north of West Siberia, similarities and differences, *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 4, 2182, DOI: 10.3390/rs12142182.

Kizyakov A.I., Günther F., Zimin M.V., Sonyushkin A.V., Zhdanova E.Yu. [Destruction of the shores of the Kolguev Island under the expansion of massive ground ices], *Materialy dokladov XV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii"* [Materials of the reports at the XV All-Russian scientific-practical conference and exhibition "Prospects of the development of engineering surveys for construction in the Russian Federation"], Moscow, Geomarketing Publ., 2019, p. 274–279. (In Russian)

Kunitsky V.V., Syromyatnikov I.I., Shirrmeister L., Skachkov Yu.B., Grosse G., Wetterich S., Grigoriev M.N. Ldistye porody i termodenudatsiya v rajone poselka Batagaj (Yanskoe ploskogorie, Vostochnaya Sibir) [Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana Upland, East Siberia)], *Kriosfera Zemli*, 2013, vol. XVII, no. 1, p. 56–68. (In Russian)

Leibman M.O., Kizyakov A.I. *Kriogennye opolzni Yamala i Yugorskogo poluostrova* [Cryogenic landslides of Yamal and Yugorsky peninsula], Moscow, Tyumen, IKZ SO RAN Publ., 2007, 206 p. (In Russian)

Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature – deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations, *Geography, Environment, Sustainability,* 2014, vol. 7, no. 4, p. 68–79, DOI: 10.24057/2071-9388-2014-7-4-68-79.

Maslakov A.A., Nyland K.E., Komova N.N., Yurov F.D., Yoshikawa K., Kraev G.N. Community ice cellars in Eastern Chukotka: Climatic and anthropogenic influences on structural stability, *Geography, Environment, Sustainability*, 2020, vol. 13, no. 3, p. 49–56, DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.

Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.N., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmoeller B., Kholodov A., Khomutov A., Kaab A., Leibman M.O., Lewkowicz A G., Panda S.K., Romanovsky V., Way R.G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km^2 scale, *Earth Science Reviews*, 2019, vol. 193, p. 299–316, DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.

Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A., Shiklomanov N., Smith S., Walker D. Changing permafrost and its impacts, *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic* (SWIPA), Oslo, Norway, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017, p. 65–102.

Sokratov S.A., Barry R.G. Intraseasonal variation in the thermoinsulation effect of snow cover on soil temperatures and energy balance, *Journal of Geophysical Research*, 2002, vol. 107, no. D9–D10, 13 p., DOI: 10.1029/2001JD000489.

Streletskaya I.D., Leibman M.O., Kizyakov A.I., Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Khomutov A.V., Dvornikov Y.A. Podzemnye ldy i ikh rol v formirovanii voronki gazovogo vybrosa na poluostrove Yamal [Ground ice and its role in the formation of gas-emission crater in the Yamal Peninsula], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2017, vol. 1, no. 2, p. 91–99. (In Russian)

Tolmanov V. Thermoerosion process on Tazovskiy peninsula. Factors and dynamics, *European Geosciences Union General Assembly 2020 (Geophysical Research Abstracts, vol. 22),* Vienna, Austria, 2020, EGU2020-825, DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-825.

Tolmanov V.A., Grebenets V.I., Yurov F.D. [Assessment of the negative impact of cryogenic processes on the infrastructure of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug], *Materialy dokladov XV Obshcherossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i vystavki "Perspektivy razvitiya inzhenernykh izyskaniy v stroitel'stve v Rossiyskoy Federatsii" [Materials of the reports at the XV All-Russian scientific-practical conference and exhibition "Prospects of the development of engineering surveys for construction in the Russian Federation"]*, Moscow, Geomarketing Publ., 2019, p. 284–290. (In Russian)

Received 16.03.2021
Revised 18.08.2021
Accepted 27.09.2021