

К ВОПРОСУ О НЕОБХОДИМОСТИ ВЫРАБОТКИ ЦЕЛОСТНОЙ СИСТЕМЫ МЕР ПО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

А. В. Брушков¹, А. Г. Алексеев^{2,3}, С. В. Бадина^{1,4}, Д. С. Дроздов^{5,6}, В. А. Дубровин⁷,
О. В. Жданеев^{8,9}, А. Б. Осокин¹⁰, М. Р. Садуртдинов⁵, Д. О. Сергеев¹¹, Р. Ю. Федоров⁵,
К. Н. Фролов¹²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений имени Н. М. Герсеванова (Москва, Российская Федерация)

³ Московский государственный строительный университет (Москва, Российская Федерация)

⁴ Университет Бернардо О'Хиггинса (Сантьяго, Чили)

⁵ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (Тюмень, Российская Федерация)

⁶ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (Москва, Российская Федерация)

⁷ Центр государственного мониторинга состояния недр и региональных работ ФГБУ «Гидроспецгеология» (Москва, Российская Федерация)

⁸ Югорский государственный университет (Ханты-Мансийск, Российская Федерация)

⁹ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Москва, Российская Федерация)

¹⁰ Инженерно-технический центр ООО «Газпром добыча Надым» (Надым, Российская Федерация)

¹¹ Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН (Москва, Российская Федерация)

¹² Центр компетенций технологического развития ТЭК при Минэнерго России (Москва, Российская Федерация)

Для цитирования

Брушков А. В., Алексеев А. Г., Бадина С. В. и др. К вопросу о необходимости выработки целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 605—616. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-605-616.

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2024 г.

Потепление климата и хозяйственная деятельность в высоких широтах оказывают существенное влияние на состояние мерзлоты. В этой ситуации большое значение имеют выявление причин возникновения деформаций зданий и сооружений, а также выработка мер по их предотвращению. С опорой на примеры, зафиксированные на территории регионов российской Арктики, рассмотрены основные причины возникновения аварийных ситуаций, связанных со снижением несущей способности мерзлых грунтов. Подвергнуты анализу меры по минимизации издержек на ремонт и замещение поврежденных зданий.

Ключевые слова: российская Арктика, деформация зданий, криолитозона, изменения климата, экономические издержки, предотвращение ущерба.

Введение

Потепление климата, особенно в высоких широтах, оказывает существенное влияние на тепловое состояние и эволюцию вечной мерзлоты. Развиваются различные криогенные процессы, непосредственно влияющие на хозяйственную инфраструктуру: термокарст, термоэрозия, крип и др. Кроме того, происходят значительные изменения ландшафтов — деформации поверхности Земли, трансформация растительного покрова, преобразования биосферы в целом. Природные процессы усиливаются хозяйственной деятельностью человека [1—3]. В результате этих процессов снижается несущая способность мерзлых оснований для зданий и инженерных сооружений. Как показала практика, предотвращение деформаций зданий и сооружений обеспечивается не только нормативами и типовыми строительными решениями, но и прогнозами, учитывающими вариативность динамики изменений природно-техногенных комплексов [4]. Эта ситуация связана с тем, что причиной экономического ущерба [5—7] от деформаций геотехнических систем являются не только природные факторы. Серьезным фактором риска в строительстве и эксплуатации объектов гражданского и промышленного назначения в Арктике стала в 1990-е годы ликвидация системы контроля состояния капитальных сооружений, проектных и технических служб по восстановлению и ремонту поврежденных зданий.

Основная задача данной статьи состоит в анализе причин возникновения аварийных ситуаций, связанных со снижением несущей способности мерзлых грунтов, а также в выработке мер по минимизации издержек на ремонт и замещение поврежденных зданий. Анализ современного состояния коммунальной инфраструктуры российской Арктики позволяет определить основные причины возникновения деформаций и разрушений зданий и сооружений, назначить необходимые для наблюдения параметры природной среды и технических систем, оценить экономические издержки хозяйствования. В качестве объектов исследования выступают гражданские и промышленные здания, а также инженерные сооружения и их основания на территории Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Методы, развиваемые сегодня в геокриологии, позволяют обеспечивать комплексный мониторинг, который включает наблюдения, анализ полученных данных, прогноз состояния вечной мерзлоты и хозяйственной инфраструктуры, а также разработку технических решений по защите природной среды, жилых и промышленных зданий и инженерных сооружений. Таким образом, формируется задача создания целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата.

Материалы и методы

В ходе исследования авторы использовали преимущественно собственные материалы по состоянию знаний и сооружений в криолитозоне. Они

были собраны в процессе инженерных изысканий и проектирования различных объектов на исследованной территории, а также при проведении геотехнического мониторинга с конца 1990-х годов по настоящее время. Для оценки технического состояния использовались количественные или качественные значения параметров, характеризующих деформативность, несущую способность и другие нормируемые характеристики строительной конструкции и грунтов основания. Помимо этого были собраны, систематизированы и проанализированы литературные и фондовые сведения, определяющие параметры устойчивости зданий и сооружений в криолитозоне, а также описывающие мерзлотные условия и состояние застройки в различных регионах Севера. Экономические издержки хозяйствования в российской Арктике были рассчитаны на основе опубликованных источников и информации по открытым тендерам.

Результаты исследований состояния промышленной и гражданской инфраструктуры в регионах

Европейский Север. Город Воркута расположен в Республике Коми в зоне прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ) с температурой $-0,2...-1,0^{\circ}\text{C}$ и участков с опущенной на 15—20 м и более кровлей мерзлоты. Неоднородность мерзлотных условий определила применение различных принципов использования ММГ в качестве основания фундаментов, создание различных видов фундаментов, внедрение охлаждающих устройств.

За последние два десятилетия доля зданий, деформации которых превысили предельные значения, значительно увеличилась. Всего в Воркуте построено 35 зданий по I принципу (с сохранением мерзлого состояния грунтов), 588 зданий — по II принципу (с допущением оттаивания). Около 40 зданий (6,5% общего числа в 2018 г.) находятся в аварийном состоянии [8] (рис. 1).

Западная Сибирь. Одни из крупнейших городов Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) Надым и Новый Уренгой были построены на территории, которая представляет собой морскую и озерно-аллювиальную равнину, сложенную грунтами песчаного и глинистого состава. В приповерхностной части инженерно-геологического разреза для грунтов характерно как многолетнемерзлое, так и талое состояние. Широкое распространение имеют ММГ с кровлей мерзлоты, заглубленной на 5—15 м и более.

Надым явился первенцем крупного жилищного строительства на Крайнем Севере Западной Сибири. Строительство города, активная фаза которого началась в 1972 г., было связано с началом освоения Надым-Пур-Тазовской нефтегазоносной провинции. Под пятно застройки первоначально был очень удачно выбран значительный по размерам фрагмент первой надпойменной террасы реки Надым,



Рис. 1. Усиленное металлическими тязами здание с частичным отселением жителей (Воркута, Локомотивная ул., д. 5а)
Fig. 1. Building reinforced by metal ties with partial resettlement of residents (Vorkuta, Lokomotivnaya St., 5a)

характеризующийся распространением с поверхности преимущественно талых грунтов аллювиального генезиса песчаного состава. Острова многолетнемерзлых грунтов были развиты фрагментарно и имели незначительную мощность. Жилые здания, преимущественно пятиэтажные, строились как на свайных, так и на ленточных фундаментах с теплыми подвалами. Опыт первых 20 лет эксплуатации жилого фонда продемонстрировал, что такая практика зарекомендовала себя положительно, в том числе на участках распространения маломощных линз ММГ. При оттаивании линз мерзлых слабльдистых песков в основаниях зданий они испытывали незначительные деформации, но в целом сохраняли работоспособное состояние.

Ситуация существенным образом изменилась на рубеже 1980-х и 1990-х годов. В городскую застройку начали вовлекаться участки высокой поймы реки Надым, характеризующейся массивно-островным распространением ММГ, которые в ряде случаев имеют значительную льдистость за счет ледяных включений на глубинах 15—20 м в ледово-морских отложениях цоколя речной террасы, подстилающих слой аллювиальных песков. Несмотря на существенно изменившиеся мерзлотно-геологические условия участков новой застройки, ранее апробированная строительная практика не претерпела изменений, и здания проектировались по II принципу использования многолетнемерзлых грунтов в основаниях.

На восьмой и десятый год эксплуатации некоторые жилые здания новой застройки стали испытывать существенные неравномерные осадки в результате оттаивания ММГ в основаниях, что привело их в аварийное состояние. Характерный пример приведен на рис. 2.

Долгое время распространенным предположением о причинах растепления мерзлоты и активных деформаций в Надyme считался процесс подтопления, инициированный техногенным воздействием

[9]. Однако дальнейшие наблюдения показали, что в реальности основным фактором оказалось тепловыделение самих сооружений. При тепловом воздействии зданий происходила деградация ММГ в их основаниях, сопровождавшаяся осадкой, часто существенной и неравномерной. В 1994—2000 гг. шесть многоквартирных домов (около 3% жилого фонда Надыма) были расселены и демонтированы. Пришли в негодность три промышленных корпуса. Около десятка капитальных зданий испытывали серьезные деформации из-за деградации в основаниях ММГ, для устранения которых потребовались существенные капиталовложения, связанные с восстановлением несущей способности оснований и несущих конструкций. Схожие проблемы с устойчивостью зданий наблюдались в Новом Уренгое. Здесь недопустимые деформации испытывают здания, построенные на участках распространения ММГ с заглубленной кровлей. Например, в аварийное состояние пришли четыре жилых дома микрорайона «Крымский». Здание школы и один девятиэтажный дом были демонтированы. В Коротчаеве были зафиксированы неравномерные осадки здания ТЭЦ и торгового центра «Ямал».

Восточная Сибирь. В Норильском промышленном районе (НПР) жилая застройка опирается либо на скальные коренные породы, либо на слабозасоленные песчано-глинистые мерзлые грунты. Во втором случае здания нередко испытывают деформации за счет снижения несущей способности основания. К концу XX в. в результате деградации мерзлоты около 250 сооружений получили значительные деформации, из них около 100 оказались в аварийном состоянии. Около 50 многоэтажных жилых домов, построенных в 1960—1980 гг., были демонтированы или подлежат в ближайшее время сносу. Особенно сильно деформации проявились на участках с полигональными жилами и сильнольдистыми грунтами.

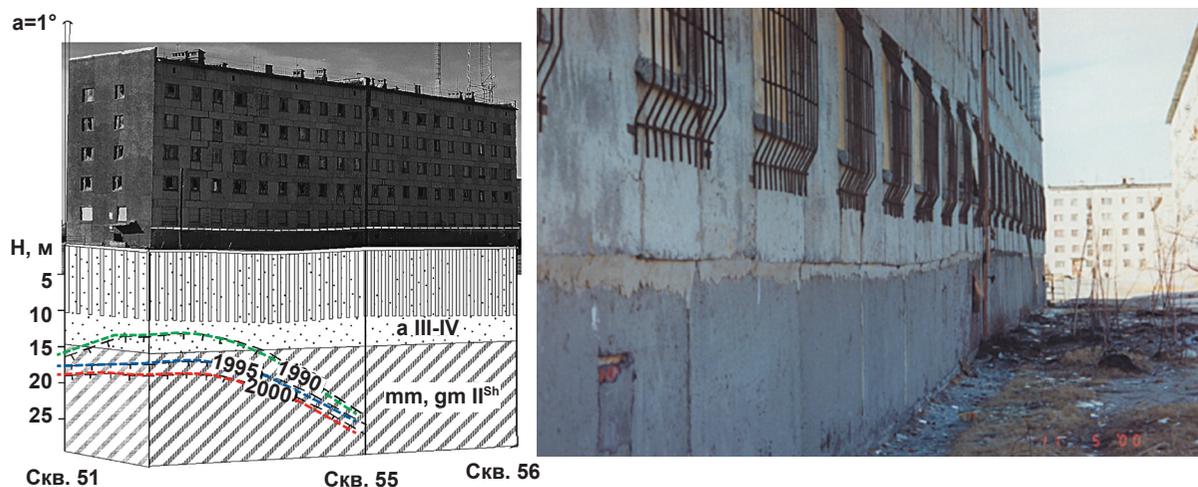


Рис 2. Деградация ММГ в основании жилого дома на свайном фундаменте и неравномерная осадка здания (Надым, микрорайон IV-а)
 Fig. 2. Permafrost degradation in the base of a residential building on a pile foundation and uneven settlement of the building (Nadym, microdistrict 4-a)

При повышении температуры и деградации ММГ наблюдается уменьшение несущей способности грунтов основания сооружений и обратной засыпки. В результате повсеместно происходят неравномерные осадки зданий, в конструкциях возникают трещины, обрушаются перекрытия подземных коллекторов. Наблюдается увеличение глубины сезонного протаивания и зоны криогенного выветривания бетона фундаментов, что в критических случаях приводит к обрушению объектов, как это произошло с кафе «Белый олень» в Кайеркане в 1976 г. и жилым домом в поселке Алыкель в 1997 г.

В 1992 г. доля поврежденных зданий в НПр составляла 10%. По данным вещательной сети ВГТРК Норильск [10], с 2012 по 2016 гг. от осадки спасено 155 городских зданий. На эти цели потрачено 862 млн руб. [10]. Сегодня доля зданий с повреждениями, связанными с осадками фундаментов, увеличилась примерно до 40%.

Природное повышение среднегодовой температуры грунтов на территории Норильска составляет +2...3°C. Когда город строился, температура была -6°C, сегодня она составляет -3...-4°C. В районе городского драматического театра на глубине 10 м ранее фиксировалась температура грунтов -4°C, сегодня -2°C и выше. При такой температуре даже разовая утечка из системы водоснабжения или отопления может привести к потере здания. По приблизительным подсчетам в настоящее время от 50—60% (Норильск) до 10—15% (Талнах, Оганер, Кайеркан) зданий и сооружений региона имеют деформации, и требуется принятие мер для повышения несущей способности оснований [11].

Якутск расположен на поверхности террас реки Лены, сложенных супесчаными и суглинистыми мерзлыми породами, имеющими природную температуру около -3...-5°C и содержащими повторно-жильные льды. На застраиваемой территории

при удалении снега и охлаждающего влияния проветриваемых подполий температура грунта опускается до -7°C, наибольшее понижение происходит в первые два-три года [12]. Это весьма благоприятно для стабильного состояния инфраструктуры. Однако при плохо организованном дренаже внутриквартального пространства могут формироваться новые пути миграции природных вод, а также вод из различных утечек, что приводит к повышению температуры грунтов оснований и деформациям сооружений.

Арктическое побережье. Здесь строительство сооружений, как правило, осуществляется с сохранением мерзлого состояния оснований. В большинстве случаев из-за засоленности мерзлые грунты находятся в пластичномерзлом состоянии.

В поселке Амдерма грунтовые основания в основном сложены морскими засоленными отложениями. Строительство на них осуществлялось преимущественно на сваях и с использованием I принципа при средней высоте проветриваемого подполья 1,5 м, что должно было обеспечить надежную работу сооружений. Тем не менее проведенное в 1991 г. обследование показало, что из 268 зданий поселка были деформированы 108, причем 12% зданий пришли в аварийное состояние (рис. 3). Из 66 каменных зданий были деформированы 32. Из 19 тепловых и электрических станций только 2 имеют незначительные деформации, а 10 находятся в аварийном состоянии. За последующие 30 лет около 50 зданий было разрушено, разобрано или брошено. К 2021 г. оказалось деформировано 59% зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных и 31% зданий из легких конструкций. В целом деформациям подвергались 60% тепловыделяющих объектов.

Поселок Диксон находится на северо-западной оконечности полуострова Таймыр, где наблюдаются

выходы скальных коренных пород, перекрытых маломощным покровом льдистых, насыщенных полигонально-жилыми льдами суглинистых отложений. Благоприятность площадок для строительства определяется мощностью ледового комплекса, которая зависит от рельефа коренного ложа. Находясь в аварийном состоянии или разрушены те сооружения, фундаменты которых (всех типов) не удалось опереть на коренные породы. Поэтому, несмотря на общую заброшенность населенного пункта, большая часть «молодой» двухэтажной и многоэтажной застройки, построенной с учетом этого фактора, находится в удовлетворительном состоянии в отличие от сооружений начального периода освоения. По результатам наблюдений за состоянием жилых домов установлено, что доля зданий с критическими деформациями в Диксоне составляет 33%, в Тикси — 22%, в Певеке — 50% [13].

Обсуждение

Причины аварийных ситуаций в строительстве на севере европейской части России и в Западной Сибири (Воркута, Надым, Пангоды, Новый Уренгой, Коротчарово) можно разделить на следующие группы;

- некачественное выполнение инженерно-геологических изысканий, во время которых оказались не зафиксированы горизонты засоленных и/или сильнольдистых грунтов, криопэги, ледяные тела;
- ошибки при проектировании, наиболее частые из которых — неверный выбор типов охлаждающих устройств и неправильное назначение глубины предстроительного оттаивания;
- некачественное строительство с применением марок строительных материалов, не соответствующих проекту, растепление ММГ при устройстве фундаментов по I принципу, а также оттаивание грунтов не на проектную глубину при предстроительном оттаивании;
- наиболее распространенная группа — нарушения норм эксплуатации сооружений, протечки воды в подполье, нарушение полов в подполье, отсутствие очистки продухов от снега в подпольях и сезонно охлаждающих устройств.

Сохранность сооружений может быть обеспечена проведением геотехнического мониторинга. В Новом Уренгое и Надыме в ряде случаев здания и сооружения имели избыточное тепловыделение в основании, ведущее к деградации мерзлых грунтов и линз мерзлоты, сопровождающейся осадками. Тем не менее все было благополучно, пока в сфере взаимодействия с сооружениями находились



Рис. 3. Разрушенное здание в поселке Амдерма на арктическом побережье
Fig. 3. Destroyed building in Amderma on the Arctic coast

малольдистые пески. Однако отсутствие (в нарушение строительных норм) геотехнического контроля (мониторинга) зданий, проектировавшихся позже на более льдистых участках, не позволило своевременно выявить опасные тенденции потери устойчивости оснований. В Якутске основными причинами неудовлетворительного технического состояния крупнопанельных и каменных зданий являются ухудшение мерзлотно-грунтовых и гидрологических условий, невыполнение проектов в части планировки и благоустройства территории возле зданий, отсутствие городской системы ливнеотводов, аварийные утечки воды [14].

Застройка и перепланировка, а также изменение поверхностного стока привели к развитию неблагоприятных процессов. Снег либо убирается, либо уплотняется транспортом, что может приводить к охлаждению грунтов. Подсыпки и перераспределение стока приводят к появлению временного водного покрова под зданиями, чему способствуют утечки водопроводов и канализационных сетей. Водный покров вызывает повышение температур грунтов и уменьшает их несущую способность. Наблюдается засоление грунтов из-за особенностей генезиса, отрицательного баланса осадков/испарений и поступления в окружающую среду сточных минерализованных вод. Минерализация понижает температуру замерзания и также ведет к снижению несущей способности мерзлых грунтов. Вызванная техногенезом хаотическая временная изменчивость температурного поля на застроенных участках может быть причиной возникновения мигрирующих линз криопэгов, которые, в свою очередь, также сокращают несущую способность оснований.

Перепады температур в условиях резко континентального климата в сочетании с высокой коррозионной активностью минерализованных вод вызывают разрушение бетона и строительных конструкций. Выпучивание свайных оснований — еще один процесс, влияющий на состояние зданий и инженерных сооружений.

Для застройки поселков на арктическом побережье (Амдерма, Диксон, Тикси, Певек), где несущая способность мерзлых грунтов снижена за счет засоленности, расчет оснований и фундаментов сооружений по действующим нормативным документам должен осуществляться как по несущей способности, так и по деформациям. Однако при проектировании это требование выполняется редко.

Во многих поселках, расположенных на арктическом побережье, за счет техногенеза происходит не снижение, а повышение температуры ММГ по сравнению с фоновой. Так, в Тикси температура составляет около -7°C , вне поселка -12°C ; в Амдерме — около -3°C , вне поселка $-4,5^{\circ}\text{C}$. При изысканиях же определяется в основном температура на еще не нарушенных участках, и в результате назначение расчетных значений прочностных характеристик мерзлых грунтов приводит к завышению проектной несущей способности оснований по сравнению с реальной. Своеобразные проблемы создают снежные заносы. Во многих местах среднезимняя скорость ветра бывает более 6 м/с, что приводит к накоплению больших масс снега из всех преград (зданий, сооружений, насыпей, заборов, наземных коммуникаций и пр.) на пути ветрового потока.

Насыпные территории — одна из наиболее эффективных форм планировки и подготовки площади для строительства. Без предварительной подсыпки вероятность деформации сооружений существенно выше. Применение сплошной подсыпки, особенно в сочетании с теплоизоляционными материалами, следует рассматривать как приоритетный способ подготовки участков для строительства с целью снижения возможных локальных ущербов. При этом следует подчеркнуть, что методика оценки общего ущерба от опасных криогенных процессов на уровне территорий и регионов пока в деталях не разработана, несмотря на ряд попыток [15].

Обычно прогнозирование рисков от изменения геокриологических условий сводится к оценке прямого ущерба для существующей инфраструктуры, т. е. дается оценка стоимости основных фондов, которые могут быть утрачены в ареалах наивысшей опасности (см., например, [16—19] и др.). При этом упускается из вида важная часть ущерба, связанная с издержками на замещение деформированных и разрушенных фондов, понимание которой необходимо с точки зрения заблаговременного изыскания необходимых финансовых ресурсов.

Величины среднегодового прямого ущерба для жилищного фонда до 2050 г. взяты из предыдущей работы авторов [7], где было осуществлено прогнозирование геокриологического риска для россий-

ской Арктики. Для расчета стоимости ликвидации деформированного жилищного фонда не вполне корректно использовать нормативные величины, например, данные, предоставляемые Минстроем России в справочниках базовых цен [20] и др., поскольку рассматриваемые населенные пункты даже в пределах своих регионов отличаются наличием специфических факторов, формирующих данный вид издержек. Поэтому для более корректной стоимостной оценки было решено обратиться к реализуемым проектам, для чего были проанализированы тендеры и госзакупки в соответствующих городах (либо близких по социально-экономическим и физико-географическим свойствам населенных пунктах) на ресурсе «РосТендер» по разделу «Работы по строительству и ремонту зданий, сооружений, внутренних и наружных сетей» [21]. В качестве примера можно привести некоторые из них: «Выполнение работ по сносу аварийного жилищного фонда на территории МО ГО «Усинск»», «Строительство объекта недвижимости «Многokвартирный жилой дом в квартале 130 г. Якутска»»; локальные сметы на аварийные и подлежащие сносу жилые дома в ЯНАО, Надымский район, село Ныда: Озерная ул., д. 7, Советская ул., д. 32/1, Советская ул., д. 38, Совхозная ул., д. 2; проект организации работ по сносу и демонтажу объекта капитального строительства: аварийный и подлежащий сносу многоквартирный жилой дом по адресу: ЯНАО, Надымский район, Надым, поселок Лесной, д. 1/23; выполнение работ по сносу домов, признанных в установленном порядке ветхими или аварийными на территории МО «Городское поселение «Рабочий поселок Искателей»» на 2017—2025 гг. по ул. Нефтяников, д. 24; локальный сметный расчет выполнения работ по сносу многоквартирного дома, признанного аварийным, расположенного по адресу: Советская ул., д. 39 (село Хатанга, Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, Красноярский край), и др. Анализ значительного числа тендеров в пределах анализируемых территорий помог получить достоверные представления о структуре современных издержек на реализацию интересующих видов работ. Усредненные показатели стоимости сноса и строительства 1 м^2 жилья (согласно информации, взятой с «РосТендера») были помножены на площадь домов, которые согласно упомянутому выше прогнозу [7] будут подвергаться деформациям и потребуют замены до 2050 г. Результаты расчетов до 2050 г. в среднегодовом выражении представлены в табл. 1. Уровень текущих затрат (см. столбец 4) слабо соответствует тем издержкам, которые могут возникнуть в ближайшем будущем.

В основе расчета среднегодовой стоимости ликвидации деформированного жилищного фонда до 2050 г. (см. табл. 1) лежит медианная стоимость работ по сносу 1 м^2 многоквартирных жилых домов в рассматриваемых городах (или при отсутствии информации — в других близких населенных пунктах других регионов), оцененная путем анализа документации конкретных тендеров по соответству-

Таблица 1. Издержки, связанные с замещением жилищного фонда (в ценах 2023 г.), млн руб.
Table 1. Costs associated with replacing the housing stock (in 2023 prices), million rubles

Город	1	2	3	4	5	6
Городской округ Воркута	67,5	2 984	1 227,1	120	4 433,1	20,5
Надым	45,2	1 224	2 500,4	154	3 491,0	59,3 *
Новый Уренгой	106,8	2 746	16 063,8	207	7 832,5	331,4
Норильск	174,5	5 057	16 109,2	450	9 216,1	1 775
Якутск	367,7	6 999	26 302,1	311	18 847,6	772,5
Амдерма	0,4	10,0	26,2	1,1	19,9	19,9
Диксон	0,3	27,5	89,5	1,6	50,2	0,0
Тикси	4,4	100,8	469,8	5,5	271,4	45,0 **
Певек	4,2	230,1	1 609,9	14,5	418,5	1,7 ***

* Надымский район.

** Булунский улус.

*** Доступны данные за 2016—2018 гг.

Примечание: числами в головке таблицы обозначены: 1 — численность населения, тыс. человек; 2 — площадь жилищного фонда, тыс. м² (по данным Государственной информационной системы жилищно-коммунального хозяйства); 3 — среднегодовой прямой ущерб до 2050 г. (потеря рыночной стоимости) для жилищного фонда [7]; 4 — среднегодовая стоимость ликвидации деформированного жилищного фонда, до 2050 г.; 5 — среднегодовая стоимость нового строительства взамен ликвидированного до 2050 г.; 6 — среднегодовые объемы финансирования переселения граждан из ветхого и аварийного жилья (средние значения за 2019—2025 гг.).

Note: the numbers in the head of the table indicate: 1 — the population, thousand people; 2 — the area of the housing stock, thousand m² (according to the State Information System of Housing and Communal Services of the Ministry); 3 — the average annual direct damage until 2050 (loss of market value) for the housing stock [7]; 4 — the average annual cost of liquidation deformed housing stock, until 2050; 5 — the average annual cost of new construction to replace the liquidated one by 2050; 6 — the average annual volume of financing resettlement of citizens from dilapidated and dilapidated housing (average values for 2019—2025).

ющему виду работ с ресурса «РосТендер» (<https://rostender.info/>) по состоянию на декабрь 2023 г.

В основу расчета среднегодовой стоимости нового строительства взамен ликвидированного до 2050 г. (см. табл. 1) лег показатель «Себестоимость строительства 1 м² общей площади по данным Единой информационной системы жилищного строительства в декабре 2023 г.» (Минстрой России, <https://наш.дом.рф>).

Среднегодовые объемы финансирования переселения граждан из ветхого и аварийного жилья (средние значения за 2019—2025 гг., см. табл. 1) основаны на данных из региональных программ по переселению граждан из аварийного жилищного фонда и других нормативно-правовых документов [22—25].

Наступление худших сценариев изменений геокриологических условий потребовало бы вложения в короткие сроки весьма значительных материальных ресурсов, возможность привлечения которых не очевидна. Поэтому целесообразно ориентироваться на перераспределение издержек во времени, например, посредством своевременной установки систем термостабилизации грунтов и разработки планов замены ветхого и аварийного жилья с уче-

том общего и объектного геокриологического прогноза. Необходимую фактуру для этого должен дать фоновый и геотехнический мониторинг. Тем самым можно будет предотвратить реализацию негативного сценария, представленного в таблице.

К сожалению, системные государственные меры по предотвращению описанных угроз до сих пор не предпринимались [26]. Более того, в текущем столетии по сравнению с предшествующим периодом отмечается снижение объема работ мерзлотной направленности в системе Минприроды России, Минстроя, Минэнерго и других ведомств и хозяйствующих субъектов, практически отсутствует межведомственный обмен информацией. При сохранении существующего положения новые инвестиции в строительство в АЗРФ могуткратно увеличить ущерб от происходящего потепления климата. В последние годы в научной среде геокриологов достигнуто понимание, что основным методом снижения экономического ущерба в криолитозоне, обусловленного изменениями климата, является создание системы государственного межведомственного мониторинга вечной мерзлоты [27; 28]. Его основной задачей должна стать координация деятельности различных ведомств и хозяйствующих субъектов

в части изучения вечной мерзлоты как одного из основополагающих факторов, определяющих как устойчивость экологической обстановки в северных регионах, так и риски их освоения. Некоторый оптимизм вселяет то, что начатое Минприродой России государственное комплексное гидрогеологическое и инженерно-геологическое картографирование АЗРФ масштаба 1:1 000 000 включает составление отдельного листа геокриологических условий с прогнозной врезкой на середину XXI в.

Выводы

Климатические флуктуации конца XX — начала XXI вв. формируют новую геокриологическую обстановку. Поэтому значительная часть накопленных данных, характеризующих состояние криолитозоны, нуждается в актуализации. Глобальный процесс потепления климата способствуют значительному увеличению аварийности инженерных сооружений и деформации зданий. Во многих случаях этот процесс усиливают следующие организационные факторы:

- ликвидация мерзлотных станций и специализированных проектных институтов;
- некачественное выполнение инженерно-геологических изысканий, что не позволяет определить необходимый комплекс геокриологических характеристик ММГ;
- ошибки при проектировании, связанные с выбором принципа строительства и отсутствием геокриологического прогноза на срок службы сооружений;
- некачественное строительство зданий и сооружений;
- ошибки при эксплуатации.

В ряде проектов строительства, разработанных после середины 1980-х годов, не были предусмотрены системы геотехнического контроля (мониторинга) инженерных объектов. Продолжение практики строительства без учета региональных прогнозов состояния вечной мерзлоты в условиях меняющегося климата можеткратно увеличить ущерб от потепления.

В последние годы среди специалистов-геокриологов достигнуто понимание, что основным превентивным методом существенного снижения экономического ущерба в криолитозоне, обусловленного изменениями климата, является создание системы государственного межведомственного мониторинга вечной мерзлоты. При этом одной из главных задач нового концептуального подхода и программных документов должны явиться сопряжение различных ведомств и координация их деятельности в части многопланового изучения вечной мерзлоты Арктики как одного из основополагающих факторов рисков освоения и одновременно формирования устойчивой экологической обстановки быстро развивающихся регионов АЗРФ. Эти меры должны применяться системно с использованием общедоступной информационной базы

мониторинговых и прогнозных данных. Для снижения природных рисков и экологических катастроф, связанных с освоением криолитозоны, необходимы разработка и принятие концепции изучения вечной мерзлоты в виде федеральной межведомственной программы «Криолитозона России» и закона о вечной мерзлоте.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзаданий ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № FWRZ-2021-0012 и № FWRZ-2021-0005 и госзадания Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН № 122022400105-9.

Литература/References

1. Мельников В. П., Дроздов Д. С. Криогенные риски арктических территорий // Арктика, Субарктика: мозаичность, контрастность, вариативность криосферы: Труды международной конференции. — Тюмень: Эпоха, 2015. — С. 243—246.
Melnikov V. P., Drozdov D. S. Cryogenic risks of Arctic territories. Arctic, Subarctic: mosaic, contrast, variability of the cryosphere: Proceedings of the International Conference. Tyumen, Epoch, 2015, pp. 243—246. (In Russian).
2. Брюховецкий О. С., Дроздов Д. С., Лаухин С. А., Яшин В. П. О доле недропользования в накопленном экологическом ущербе Арктической зоны Российской Федерации // Изв. вузов: Геология и разведка. — 2014. — № 6. — С. 59—63.
Bryukhovetsky O. S., Drozdov D. S., Laukhin S. A., Yashin V. P. On the share of subsoil use in the accumulated environmental damage of the Arctic zone of the Russian Federation. News of universities: Geology and exploration, 2014, no. 6, pp. 59—63. (In Russian).
3. Павленко В. И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 4 (12). — С. 16—25.
Pavlenko V. I. Arctic zone of the Russian Federation in the system of ensuring the national interests of the country. Arctic: Ecology and Economy, 2013, no. 4 (12), pp. 16—25. (In Russian).
4. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Badina S. V., Sadurtdinov M. R., Drozdov D. S., Malkova G. V., Zheleznyak M. N., Zhdaneev O. V., Ostarkov N. A., Osokin A. B., Sergeev D. O., Dubrovin V. A., Kuznetsov M. E., Frolov K. N., Alekseev A. G., Fedorov R. Yu. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure. *Energies*, 2022, vol. 15 (9), p. 3190.
5. Badina S. V. Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic. *Polar Science*, 2021, vol. 29, p. 100730.
6. Мельников В. П., Осипов В. И., Брушков А. В. и др. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века //

- Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2021. — № 1. — С. 14—31.
- Melnikov V. P., Osipov V. I., Brushkov A. V., Badina S. V., Drozdov D. S., Dubrovin V. A., Zheleznyak M. N., Sadurtdinov M. R., Sergeev D. O., Ostarkov N. A., Falaleeva A. A., Shelkov Y. Yu. Assessment of damage to residential and industrial buildings and structures during temperature changes and thawing of permafrost soils in the Arctic Zone of the Russian Federation by the middle of the 21st century. *Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2021, no. 1, pp. 14—31. (In Russian).
7. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V., Falaleeva A. A., Badina S. V., Zheleznyak M. N., Sadurtdinov M. R., Ostrakov N. A., Drozdov D. S., Osokin A. B., Sergeev D. O., Dubrovin V. A., Fedorov R. Yu. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022, vol. 112 (1), pp. 231—251.
8. Алексеев А. Г., Рабинович М. В. Влияние изменяющегося климата на техническое состояние зданий и сооружений арктического региона России на примере городского округа Воркута // Вестн. НИЦ. Строительство. — 2019. — № 4 (23). — С. 35—43.
- Alekseev A. G., Rabinovich M. V. The impact of a changing climate on the technical condition of buildings and structures in the Arctic region of Russia on the example of the urban district of Vorkuta. *Vestnik NIC. Construction*, 2019, no. 4 (23), pp. 35—43. (In Russian).
9. Шахрамьян М. А., Акимов В. А., Козлов К. А. Оценка природной и техногенной безопасности России. Теория и практика. — М.: ВНИИ ГОЧС, 1998. — 218 с.
- Shakhramanyan M. A., Akimov V. A., Kozlov K. A. Assessment of the natural and technogenic safety of Russia. *Theory and practice*. Moscow, VNIIGOCHS, 1998, 218 p. (In Russian).
10. Порошина С. С. Растепление вечномёрзлых грунтов под зданиями в Норильске // Градостроительство и архитектура. — 2018. — Т. 8, № 2. — С. 65—70.
- Poroshina S. S. Thawing of permafrost soils under buildings in Norilsk. *Urban planning and architecture*, 2018, vol. 8, no. 2, pp. 65—70. (In Russian).
11. Бахматов Н. Н. Влияние деградации вечной мерзлоты на фундаменты и основания зданий и сооружений в НПр. — URL: <https://multiurok.ru/files/vliianiie-dieghradatsii-viechnoi-mierzloty-na-fundamienty-i-osnovaniia-zdani-i-sooruzhienii-v-npr.html>.
- Bakhmatov N. N. Impact of permafrost degradation on foundations and bases of buildings and structures in NPR. Available at: <https://multiurok.ru/files/vliianiie-dieghradatsii-viechnoi-mierzloty-na-fundamienty-i-osnovaniia-zdani-i-sooruzhienii-v-npr.html>. (In Russian).
12. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э. Д. Ершова. — М.: Недра, 1989. — 514 с.
- Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East. E. D. Ershov (ed.). Moscow, Nedra, 1989, 514 p. (In Russian).
13. Велли Ю. Я. Исследования засоленных вечномерзлых грунтов арктического побережья // Засоленные мерзлые фунты как основания сооружений. — М.: Наука, 1990. — С. 9—20.
- Welli Yu. Ya. Studies of saline permafrost soils of the Arctic coast. Saline frozen pounds as foundations of structures. Moscow, Nauka, 1990, pp. 9—20. (In Russian).
14. Алексеева О. И., Балобаев В. Т., Григорьев М. Н. и др. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) // Криосфера Земли. — 2007. — № 2. — С. 76—83.
- Alekseeva O. I., Balobaev V. T., Grigoriev M. N., Makarov V. N., Zhang R. V., Shats M. M., Shepelev V. V. On the problems of urban planning in the cryolithozone (on the example of Yakutsk). *Cryosphere of the Earth*, 2007, no. 2, pp. 76—83. (In Russian).
15. Водолазкин В. М., Хрусталева Л. Н. Использование оттаивающих грунтов в качестве оснований инженерных сооружений // Тр. Север. отд-ния НИИОСП. — Вып. 5. — Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1986. — С. 17—22.
- Vodolazkin V. M., Khrustaleva L. N. The use of thawing soils as the foundations of engineering structures. *Proceedings of the Northern Branch of NIIOOSP*, iss. 5. Syktyvkar, Komi Book Publishing House, 1986, pp. 17—22. (In Russian).
16. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by midcentury. *Nature communications*, 2018, vol. 9 (1), p. 5147.
17. Streletskiy D. A., Suter L., Shiklomanov N. I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, no. 2, p. 025003.
18. Sute L., Shiklomanov N., Streletskiy D. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019, no. 42, pp. 267—286.
19. Ogorodov S., Badina S., Bogatova D. Sea coast of the western part of the Russian Arctic under climate change: Dynamics, technogenic influence and potential economic damage. *Climate*, 2023, vol. 11, no. 7, p. 143.
20. Минстрой России. Справочники базовых цен. — URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/tseoobrazovanie/spravochniki-bazovykh-tsen/>. Ministry of Construction of Russia. Reference price references. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/tseoobrazovanie/spravochniki-bazovykh-tsen/>. (In Russian).
21. РосТендер. — URL: <https://rostender.info/category/tendery-snos-avarijnogo-jilya>. RosTender. Available at: <https://rostender.info/category/tendery-snos-avarijnogo-jilya>. (In Russian).
22. Программа по переселению граждан из аварийного жилищного фонда и жилищного фонда, планируемого к признанию аварийным, на территории Ямало-Ненецкого автономного округа

на 2019—2028 годы. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/558875125>.

The program for the resettlement of citizens from the emergency housing stock and the housing stock planned to be recognized as emergency in the Yamal-Nenets Autonomous Okrug for 2019—2028. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/558875125>. (In Russian).

23. Республиканская адресная программа «Переселение граждан из аварийного жилищного фонда в 2019—2025 годах». — URL: <http://oldarch.rkomi.ru/content/11436/%D0%9F%20160.pdf>.

Republican address program “Resettlement of citizens from emergency housing in 2019—2025”. Available at: <http://oldarch.rkomi.ru/content/11436/%D0%9F%20160.pdf>. (In Russian).

24. Комплексный план социально-экономического развития муниципального образования г. Норильск. — Утв. распоряжением Правительства РФ от 10 декабря 2021 г. № 3528-р. — URL: <http://static.government.ru/media/files/ifhn6ujdljb9jSSO0xeJssLuTtqsEx26.pdf>.

Comprehensive Plan of Social and Economic Development of Norilsk Municipality. Approved by order of the Government of the Russian Federation of December 10, 2021 no. 3528-r. Available at: <http://static.government.ru/media/files/ifhn6ujdljb9jSSO0xeJssLuTtqsEx26.pdf>. (In Russian).

25. Муниципальная программа «Переселение граждан из аварийного жилищного фонда на территории городского округа Пе-

век на 2016—2018 годы». — URL: <https://go-pevek.ru/munitsipalnaya-vlast/administratsiya/munitsipalnye-programmy/>.

Municipal program “Resettlement of citizens from emergency housing in the territory of the urban district of Pevek for 2016—2018”. Available at: <https://go-pevek.ru/munitsipalnaya-vlast/administratsiya/munitsipalnye-programmy/>. (In Russian).

26. Chesnokova I. V., Popova A. A., Sergeev D. O., Titenko G. S. Infrastructure’s Adaptation to Climate Change at the Russian Cold Region’s Territories. Permafrost 2021: Merging Permafrost Science and Cold Regions Engineering. American Society of Civil Engineers, 2021, pp. 260—265. Available at: <https://doi.org/10.1061/9780784483589>.

27. Мельников В. П., Трофимов В. Т., Орлов В. П. и др. Разработка и принятие доктрины изучения и охраны вечной мерзлоты — необходимый элемент стратегии развития АЗРФ // Регион. энергетика и энергосбережение. — 2018. — № 1. — С. 40—41. Melnikov V. P., Trofimov V. T., Orlov V. P., Brushkov A. V., Drozdov D. S., Dubrovin V. A. Development and adoption of the doctrine of the study and protection of permafrost is a necessary element of the development strategy of the AZRF. Regional energy and energy saving, 2018, no. 1, pp. 40—41. (In Russian).

28. Алексеев А. Г. Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах: Учебное пособие. — М.: АСБ, 2019. — 112 с.

Alekseev A. G. Geotechnical monitoring on permafrost: a textbook. Moscow, ASB, 2019, 112 p. (In Russian).

Информация об авторах

Брушков Анатолий Викторович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геокриологии, геологический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1), e-mail: brouchkov@geol.msu.ru.

Алексеев Андрей Григорьевич, кандидат технических наук, руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований Научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова АО НИЦ «Строительство» (109428, Россия, Москва, 2-я Институтская ул., д. 6); доцент, Московский государственный строительный университет (129337, Россия, Москва, Ярославское шоссе, д. 26), e-mail: adr-alekseev@yandex.ru.

Бадина Светлана Вадимовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория геоэкологии Севера, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1); Университет Бернардо О’Хиггинса (Chile, Santiago, Avenida Viel, 1497), e-mail: bad412@yandex.ru.

Дроздов Дмитрий Степанович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заместитель директора по научной работе, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), профессор, кафедра инженерной геологии, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе (117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23), e-mail: ds_drozdov@mail.ru.

Дубровин Владимир Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист, Управление государственного мониторинга состояния недр ФГБУ «Гидроспецгеология» (123060, Россия, Москва, ул. Маршала Рыбалко, д. 4), e-mail: dva946@yandex.ru.

Жданев Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор Высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет (628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, Ханты-Мансийск, ул. Чехова, д. 16); доцент, кафедра стратегического предпринимательства и инноваций, Российская

академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (119571, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 82, стр. 1), e-mail: zhdaneev@rosenergo.gov.ru.

Осокин Алексей Борисович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника Инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Надым» (629730, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, Надым, Полярная ул., д. 1/1), e-mail: osokinab@mail.ru.

Садуртдинов Марат Ринатович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: mr_sadurtdinov@mail.ru.

Сергеев Дмитрий Олегович, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (101000, Россия, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2, а/я 145), e-mail: sergeevdo@mail.ru.

Федоров Роман Юрьевич, доктор исторических наук, главный научный сотрудник, Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН (625026, Россия, Тюмень, ул. Малыгина, д. 86), e-mail: r_fedorov@mail.ru.

Фролов Константин Николаевич, директор проекта, Центр компетенций технологического развития ТЭК, ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России (127083, Россия, Москва, ул. 8 Марта, д. 12), frolov@rosenergo.gov.ru.

ON THE NEED TO DEVELOP A COMPREHENSIVE SYSTEM OF PREVENTIVE MEASURES AGAINST DEFORMATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN THE CRYOLITHOZONE UNDER CLIMATE CHANGE

Brouchkov, A. V.¹, Alekseev, A. G.^{2,3}, Badina, S. V.¹⁴, Drozdov, D. S.^{5,6}, Dubrovin, V. A.⁷, Zhdaneev, O. V.^{8,9}, Osokin, A. B.¹⁰, Sadurtdinov, M. R.⁵, Sergeev, D. O.¹¹, Fedorov, R. Yu.⁵, Frolov, K. N.¹²

¹ Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

² Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures; NIU MGSU (Moscow, Russian Federation)

³ National Research University Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russian Federation)

⁴ Bernardo O'Higgins University (Santiago, Chile)

⁵ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS (Tyumen, Russian Federation)

⁶ Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze (Moscow, Russian Federation)

⁷ GBU Gidropetsgeologiya (Moscow, Russian Federation)

⁸ Ugra State University (Khanty-Mansiysk, Russian Federation)

⁹ The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Moscow, Russian Federation)

¹⁰ ООО Gazprom Dobycha Nadym (Nadym, Russian Federation)

¹¹ E. M. Sergeev Institute of Geoecology RAS (Moscow, Russian Federation)

¹² Competence Center for Technological Development of the Fuel and Energy Complex, REA of the Ministry of Energy of Russia (FGBUI "Russian Energy Agency" of the Ministry of Energy of Russia) (Moscow, Russian Federation)

For citing

Brouchkov, A. V., Alekseev, A. G., Badina, S. V. et al. Methodology for estimating greenhouse gas emissions from Arctic shipping. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 605—616. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-605-616. (In Russian).

The article was received on April 6, 2024

Abstract

As a result of increasing permafrost degradation, caused by climate warming, there is a growth in the number of deformations of buildings and structures in the regions of the Russian Arctic. The article examines in detail examples of building deformations in the north of the European part of Russia, in Western and Eastern Siberia, and on the Russian Arctic coast. The authors analyze and typify main causes of contingency situations. These include insufficient engineering and geological surveys, design errors, poor-quality construction of buildings and structures and violations of current standards for their operation. A serious risk factor in the construction and operation of civil and industrial facilities in the Arctic zone of the Russian Federation caused the liquidation of

the previously existing system for monitoring the condition of capital structures, design and technical services that specialized in the restoration and repair of damaged buildings. At the same time, following up the construction practice without taking into account regional forecasts of the permafrost state under climate change can multiply the damage from global warming. To solve the problem, it is necessary to restore the system of control, notification and protection of structures, based on the creation of a federal system for permafrost monitoring, including background and geotechnical components, and uniting various departments and economic entities. This measure will significantly reduce the technical and environmental costs of current economic activity in the Russian Arctic.

Keywords: *Russian Arctic, building deformation, cryolithozone, climate change, economic costs, damage prevention.*

Funding

This research has been supported by the state assignments of the Earth Cryosphere Institute no. FWRZ-2021-0012 and no. FWRZ-2021-0005, and by the state assignments of the Geoecology Institute of RAS No. 122022400105-9.

Information about the authors

Brouchkov, Anatolii Victorovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Head of the Department of geocryology, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: brouchkov@geol.msu.ru.

Alexeev, Andrei Grigorievich, PhD of Engineering sciences, Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research of Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (6, 2nd Institut'skaya St., Moscow, Russia, 109428; Associate Professor of NIU MGSU (26, Yaroslavskoye shosse, Moscow, Russia, 129337), e-mail: adr-alekseev@yandex.ru.

Badina, Svetlana Vadimovna, PhD of Geography, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie gory, Moscow, Russia, 119991); Bernardo O'Higgins University (Avenida Viel, 1497, Santiago, Chile), e-mail: bad412@yandex.ru.

Drozdov, Dmitrii Stepanovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Associate director, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026); Professor, Department of Engineering Geology, Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze (23, Miklukho-Maklaya St., Moscow, Russia, 117997), e-mail: ds_drozdov@mail.ru.

Dubrovin, Vladimir Alexandrovich, PhD of Geology and Mineralogy, Chief Specialist, State Subsoil Monitoring Center, FGBU Gidropetsgeologiya (4, Marshala Rybalko St., Moscow, Russia, 123060), e-mail: dva946@yandex.ru.

Zhdaneev, Oleg Valerievich, Doctor of Engineering sciences, Professor of the Higher Oil School of Ugra State University (16, Chekhov St., Khanty-Mansiysk, Russia, 628012); Associate Professor, Department of Strategic Entrepreneurship and Innovation, The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (82, Vernadsky St., Moscow, Russia, 119571), e-mail: zhdaneev@rosenergo.gov.ru.

Osokin, Alexei Borisovich, PhD of Geology and Mineralogy, Deputy Head of the Engineering and Technical Center of OOO Gazprom Dobycha Nadym (1/1, Polyarnaya St., Nadym, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Russia, 629730), e-mail: osokinab@mail.ru.

Sadurtdinov, Marat Rinatovich, PhD of Engineering sciences, Leading Researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), e-mail: mr_sadurtdinov@mail.ru.

Sergeev, Dmitrii Olegovich, PhD of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory, E. M. Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences (P.O. Box 145, build. 2, 13, Ulansky lane, Moscow, Russia, 101000), e-mail: sergueevdo@mail.ru.

Fedorov, Roman Yurievich, Doctor of History, Chief Researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS (86, Malygina St., Tyumen, Russia, 625026), e-mail: r_fedorov@mail.ru.

Frolov, Konstantin Nikolaevich, Project Director, Center for Competence of Technological Development of the Fuel and Energy Complex, REA of the Ministry of Energy of Russia (FGBUI "Russian Energy Agency" of the Ministry of Energy of Russia), (12, March 8 St., Moscow, Russia, 127083), frolov@rosenergo.gov.ru.

© Brouchkov A. V., Alekseev A. G., Badina S. V., Drozdov D. S., Dubrovin V. A., Zhdaneev O. V., Osokin A. B., Sadurtdinov M. R., Sergeev D. O., Fedorov R. Yu., Frolov K. N., 2024