

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 624.139

DOI: 10.15372/KZ20210601

АДАПТАЦИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ АРКТИКИ И СУБАРКТИКИ
К ИЗМЕНЕНИЯМ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

**В.П. Мельников¹⁻⁴, В.И. Осипов⁵, А.В. Брушков⁶, С.В. Бадина^{7,8}, Д.С. Дроздов^{1,9,10},
В.А. Дубровин¹⁰, М.Н. Железняк¹¹, М.Р. Садуртдинов¹, Д.О. Сергеев⁵, С.Н. Окунев¹²,
Н.А. Остарков¹³, А.Б. Осокин¹⁴, Р.Ю. Федоров^{1,2}**

¹ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,

625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; melnikov@ikz.ru, s.m.r@rambler.ru

² Отдел методологии междисциплинарных исследований криосферы ТюмНЦ СО РАН,
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; r_fedorov@mail.ru

³ Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Семакова, 10, Россия

⁴ АНО "Губернская академия", 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

⁵ Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН,

101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; osipov@geoenv.ru, sergueevdo@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический ф-т, кафедра геоэкологии,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; broushkov@geol.msu.ru

⁷ Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, 117997, Москва, Стремянный пер., 36, Россия

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,
лаборатория геоэкологии Севера, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; bad412@yandex.ru

⁹ Российский государственный геологоразведочный университет имени С. Орджоникидзе,
117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23, Россия; ds_drozdov@mail.ru

¹⁰ ФГБУ "Гидроспецгеология", 123060, Москва, ул. Маршала Рыбалко, 4, Россия; dva946@yandex.ru

¹¹ Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,

677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; fe1956@mail.ru

¹² ООО НПО "Фундаментстройаркос", 625014, Тюмень, ул. Новаторов, 12а, Россия; okunev@npo-fsa.ru

¹³ Министерство по развитию Дальнего Востока и Арктики, 119121, Москва, ул. Бурденко, 14, Россия;
n.ostarkov@vostokgosplan.ru

¹⁴ ИТЦ ООО "Газпром добыча Надым", 629730, Надым, ул. Пионерская, 14, Россия; osokinab@mail.ru

Проблема устойчивого развития экономики остро проявляется в арктических регионах, что обусловлено уязвимостью арктической инфраструктуры при изменении климата и трансформациях ландшафтов. Рассмотрены причины деформаций зданий и сооружений в Российской Арктике. Обозначены проблемы и перспективы развития сети мониторинга криолитозоны как основы для разработки технических решений по адаптации инфраструктуры Арктики к климатическим изменениям. Выполнен анализ технологических решений управления и обеспечения надежности несущей способности оснований методами регулирования состояния многолетнемерзлых грунтов, а также предварительный анализ экономической эффективности защитных мероприятий, стоимость которых по крайней мере на порядок меньше предполагаемого в середине столетия ущерба инфраструктуре.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, многолетнемерзлые грунты, изменения климата, адаптация инфраструктуры, термостабилизация.

ADAPTATION OF ARCTIC AND SUBARCTIC INFRASTRUCTURE
TO CHANGES IN THE TEMPERATURE OF FROZEN SOILS

**V.P. Melnikov¹⁻⁴, V.I. Osipov⁵, A.V. Broushkov⁶, S.V. Badina^{7,8}, D.S. Drozdov^{1,9,10},
V.A. Dubrovin¹⁰, M.N. Zheleznyak¹¹, M.R. Sadurtdinov¹, D.O. Sergeev⁵, S.N. Okunev¹²,
N.A. Ostarkov¹³, A.B. Osokin¹⁴, R.Yu. Fedorov^{1,2}**

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen,
625026, Russia; melnikov@ikz.ru

² Laboratory of Methodology for Interdisciplinary Cryosphere Research, Tyumen Scientific Centre SB RAS,
Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia

³ Tyumen State University, Semakova str. 10, Tyumen, 625003, Russia

⁴ ANO "Gubernskaya Academia", Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia

⁵ Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Ulanskiy per. 13, bldg 2, Moscow, 101000, Russia

© В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Бадина, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, С.Н. Окунев, Н.А. Остарков, А.Б. Осокин, Р.Ю. Федоров, 2021

⁶ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geocryology, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

⁷ Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny lane 36, Moscow, 117997, Russia

⁸ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,

Laboratory of Geoecology of the Northern Territories, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia

⁹ Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Mikluho-Maklaya str. 23, Moscow, 117997, Russia

¹⁰ FGBU "Gidrospecegeologiya", Marshall Rybalko str. 6, bldg 4, Moscow, 123060, Russia

¹¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia

¹² ООО НПО "Fundamentstrojarkos", Novatorov str. 12a, Tyumen, 625014, Russia

¹³ Ministry of Far East and Arctic Development, Burdenko str. 14, Moscow, 119121, Russia

¹⁴ ИТC ООО "Gazprom dobycha Nadym", Pionerskaya str. 14, Nadym, 629730, Russia

The problem of sustainable economic development is acutely manifested in the Arctic regions, which is due to the vulnerability of the Arctic infrastructure to climate change and landscape transformations. The reasons for deformations of buildings and structures in the Russian Arctic are considered. The problems and prospects for the development of the permafrost monitoring network are identified as the basis for the development of technical solutions for adapting the Arctic infrastructure to climate change. The analysis of technological solutions for control and ensuring the reliability of the bearing capacity of foundations by methods of regulating the state of permafrost soils is presented, a preliminary analysis of the economic efficiency of protective measures is carried out, the cost of which is at least an order of magnitude less than the expected damage to infrastructure by the middle of the century.

Key words: Arctic zone of the Russian Federation, permafrost, frozen soils, climate change, adaptation of infrastructure, thermal stabilization.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем устойчивого развития экономики является адаптация гражданской и промышленной инфраструктуры к глобальным изменениям климата [Infrastructure..., 2011; Zimmerman, 2011]. Эта проблема особо остро проявляется в арктических регионах, где, с одной стороны, потепление происходит быстрее по сравнению с глобальными тенденциями [Larsen et al., 2014], а с другой – высока уязвимость арктической инфраструктуры при повышении температуры воздуха и грунтов и трансформациях мерзлоты и ландшафтов. Для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), где добывается более 90 % никеля и кобальта, 60 % меди, более 96 % платиноидов и извлекается около 80 % газа и 60 % нефти от общероссийского производства [Брюховецкий и др., 2014], потепление стало основным фактором экономических и геоэкологических рисков.

За счет повышения температуры снижается несущая способность мерзлых грунтов, во многих местах с поверхности они оттаивают, развиваются разрушительные криогенные (мерзлотные) процессы. Так, на Европейском Севере современные климатические изменения за период с 1984 по 2019 г. обусловили повышение температуры грунтов на глубине 10 м на 0.5–1.5 °С. При этом существенно сместилась к северу южная граница распространения островной мерзлоты (в Печорской низменности – в среднем на 30–40 км, на равнинах Приуралья – максимально до 80 км). В Западной Сибири в северной тайге и лесотундре на широте 65–66° среднегодовые температуры пород повысились в среднем на 1–2 °С. На Ямале в зоне типичной тундры (68–71° с.ш.), по данным более чем 40-летних наблюдений, повышение темпера-

туры многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине 10 м происходило в среднем со скоростью 0.05 °С/год [Мельников и др., 2021]. В результате повышение среднегодовой температуры ММП по сравнению с фоновым состоянием 70–80-х гг. прошлого столетия составило от 1.5 до 2 °С [Осокин, 2011].

В результате таких изменений под угрозой оказываются созданные за последние 100 лет на территории Российской Арктики промышленные комплексы и обслуживающие их города. Сегодня требуется их адаптация к изменившейся климатической и мерзлотной обстановке, без которой растёт аварийность геотехнических систем. Например, количество деформированных объектов составляет 25–50 % от общего их числа. Так, в Амдерме количество разрушающихся зданий составляет около 40 %, в Диксоне – 33 %, в Тикси – 22 %, в Певеке – 50 % [Брушков и др., 2021]; криогенные факторы являются причиной значительного числа отказов технических систем нефтегазовой отрасли. В ряде исследований, в том числе в [Мельников и др., 2021], для территории АЗРФ приведены оценки ожидаемого в результате потепления материального ущерба [Shiklomanov et al., 2019; Streletskiy et al., 2012, 2019]. Очевидным становится то, что проектирование новых объектов следует вести ориентируясь не на сегодняшние, а на прогнозные мерзлотно-климатические условия.

ПРИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В АРКТИКЕ

На территориях со сплошным распространением ММП строительство, как правило, осуществляется по I принципу, т. е. с сохранением их

мерзлого состояния. Для поддержания мерзлого состояния в качестве охлаждающей системы в основном используется вентилируемое подполье, конструкция которого на момент проектирования обеспечивала мерзлое состояние основания. Однако во многих случаях из-за засоленности, а теперь и из-за потепления грунты находятся в пластично-мерзлом состоянии, причем нередко имеют высокую льдистость. В результате, как показывают наблюдения за зданиями в городах и поселках Амдерма, Диксон, Тикси, Певек и др., продолжают деформироваться десятилетиями. Соответственно, расчет оснований и фундаментов сооружений должен был бы осуществляться как по несущей способности, так и по деформациям. На практике это требование до сих пор выполняется редко.

В идеале на застроенных территориях температуры грунтов должны были бы быть ниже, чем в естественных условиях, из-за удаления снега и выхолаживающих проветриваемых подполий. Так, в Якутске, где в естественных условиях тайги или открытых пространств температуры грунтов составляют $-3...-5$ °С, на застроенной площади они опускаются до -7 °С. Наибольшее понижение температуры грунта под зданием происходит в первые 2–3 года после начала эксплуатации [Геокриология СССР, 1989]. Здесь современное строительство осуществляется на свайных фундаментах, подполье проветриваются, снег на улицах убирается или уплотняется, в результате чего на территории застройки температура грунтов в це-

лом ниже, чем на окружающих площадях (рис. 1). Однако внутриквартальное пространство при этом плохо дренируется, из-за нарушения стока и утечек происходит образование новых путей движения отепляющей воды, что приводит к повышению температуры оснований, а это, в свою очередь, к деформации некоторых зданий. В целом же неблагоприятные участки не характерны для Якутска, в то время как в других населенных пунктах такие участки встречаются часто, и благоприятные тенденции изменения теплового состояния мерзлых грунтов в населенных пунктах наблюдаются не всегда.

Как показали исследования И.Н. Эзау с соавт. [Esau et al., 2019], например, в пос. Тикси температура грунтов в среднем составляет -7 °С, а вне поселка до -12 °С, в Амдерме, соответственно, -3 °С на территории застройки, а в ненарушенных условиях вне поселка -4.5 °С. В г. Нефтеюганске температура земной поверхности выше, чем за его пределами, примерно на 3 °С. Основные причины – это нерациональное перераспределение поверхностного стока, утечки из водопроводных и канализационных сетей, несвоевременное и недостаточное удаление снега.

Проблемой, особенно на арктическом побережье, являются снежные заносы. Многие поселки в Арктике расположены на территориях со средней скоростью ветра более 7 м/с. Застроенная территория представляет собой преграду на пути ветрового потока, поэтому здесь отлагаются большие массы перевеиваемого снега. При этом снег,

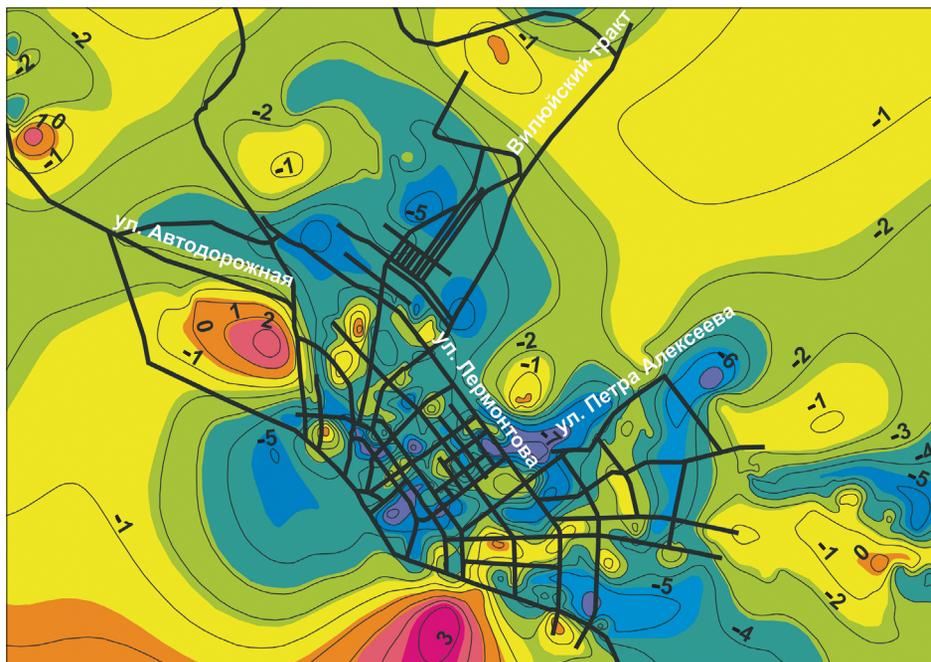


Рис. 1. Изолинии температуры многолетнемерзлых грунтов в г. Якутске и его окрестностях в 2015 г. Предоставлено Министерством строительства Республики Саха (Якутия), © П. Семенов.

как правило, оказывает сильное утепляющее воздействие, что также является причиной осадок поверхности и деформаций зданий и сооружений.

Важной задачей при строительстве остается максимально возможное сохранение мохово-растительного покрова в непосредственной близости от застройки и за ее пределами, способного охлаждать грунты на 1–2 °С и более.

Значительный ущерб сооружениям наносит термоабразия в небольших населенных пунктах, построенных в опасной близости к морю. При отступании морских берегов со скоростью более 3 м в год здания, дороги, причалы, склады горючесмазочных и других материалов оказываются в опасной зоне и требуют защиты или переноса. Известны примеры разрушений, вызванных термоабразией в поселках Диксон, Тикси, Варандей, Амдерма, Харасавэй, Се-Яха и др.

Обычно причиной деформаций оснований зданий и сооружений является нарушение температурного режима грунтов при строительстве и эксплуатации, преимущественно из-за теплового влияния зданий и попадания сточных вод в основание. Есть и другие, организационно-технические причины деформаций зданий. Среди них наиболее частая – недостаточная устойчивость материалов к воздействию внешних факторов (например, соленых вод) и низкая морозостойкость бетона строительных конструкций. Это проявляется и в Арктике (Норильск), и южнее, в районах с резко континентальным климатом (Якутск). Помимо фундаментов страдают трубы и линии связи. По данным С.С. Вялова [1992], большая часть отказов оснований и фундаментов зданий и сооружений (в среднем 45 %) происходит из-за неправильной их эксплуатации: на ошибки изыскателей и проектировщиков приходится в среднем 22 %, на брак строителей – в среднем 33 %.

Среди инженерных объектов Арктики и Севера в целом доминируют геотехнические системы (ГТС) нефтегазового комплекса. Здесь большинство опасных ситуаций развиваются уже в первые 2–3 года эксплуатации ГТС. Техногенное воздействие на мерзлоту является одной из основных причин нештатных ситуаций независимо от стадии жизненного цикла объектов. Например, на действующих газопромысловых объектах Ямбургского и Медвежьего месторождений кровля мерзлоты в основании отдельных сооружений со временем понизилась до 7.5–8.0 м, что превысило глубину заложения свай и обусловило потерю несущей способности оснований и возникновение аварийных ситуаций [Ремизов и др., 1997]. Деформации подвержены магистральные трубопроводы с температурой продукта, отличной от температуры вмещающих пород. Вокруг трубопроводов с положительной температурой транспортируемого продукта образуются техногенные талики, что

сопровождается проседанием поверхности, термокарстом, термоэрозией и всплыванием трубопровода. Вокруг “холодных” трубопроводов возникает мерзлый ореол, который барражирует грунтовый сток в сезонном слое и подрусловой сток в долинах, инициируя другие процессы. Много проблем связано со старыми добывающими скважинами, которые строились без надлежащих методов теплоизоляции лифтовых колонн. Высокая положительная температура добываемого газа в пласте (до +36 °С) для сеноманского газа Медвежьего и Уренгойского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) оказывает утепляющее воздействие на всю многолетнемерзлую толщу, что сопровождается образованием ореолов оттаивания вокруг стволов скважин, формированием приустевых воронок, развитием термокарстовых просадок, смятием самих эксплуатационных колонн [Березняков и др., 1997].

Таким образом, примеры и причины деформаций зданий и инженерных сооружений в Арктике многочисленны, имеют природное, техногенное и смешанное происхождение. Ремонт и восстановление отдельных зданий обходится, как показано ниже, в 25–100 % от их начальной стоимости в зависимости от оперативности принятия мер.

Мониторинг криолитозоны как основа для разработки технических решений по адаптации инфраструктуры Арктики к климатическим изменениям

Государственный мониторинг криолитозоны должен представлять собой межведомственную систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, во-первых, для оценки состояния вечной мерзлоты в естественных и техногенно-нарушенных условиях; во-вторых, для составления прогнозов ее изменений под влиянием природных факторов, земле- и недропользования, промышленности, строительства, жилищно-коммунального хозяйства; в-третьих, для разработки методов регулирования состояния вечной мерзлоты для охраны и рационального использования криогенных ресурсов и устойчивого развития криолитозоны.

Для наблюдений создается специализированная сеть, включающая полигоны, стационары, площадки регулярного посещения в естественных условиях и объектах инфраструктуры [Мельников и др., 2018]: 1) наблюдательные скважины для всестороннего изучения геологического (геокриологического, гидрогеологического и т. п.) разреза и для регулярного измерения температуры горных пород, являющейся одним из основных показателей стабильности состояния криолитозоны; 2) наблюдательные площадки для регулярного измерения параметров деятельного слоя (годовой цикл глубины промерзания и оттаивания и изменения

влажности/льдистости); 3) наблюдательные площадки для фиксации динамики экзогенных (в том числе криогенных) процессов, изменения гидрогеологических, гидрологических и ландшафтных условий.

Геокриологические стационарные (режимные) площадки в криолитозоне Западной Сибири закладывались с начала 1970-х гг. в связи с разведкой и начинающимся обустройством крупнейших нефтегазоконденсатных месторождений. Многолетние ряды наблюдений удавалось организовать только в отдельных пунктах (Игарка, Якутск, Надым, Марре-Сале, площадь Уренгойского месторождения и др.). В целом геокриологический мониторинг остается в значительной мере локальным. Мониторинговые исследования за состоянием вечной мерзлоты в Среднесибирском и Якутском секторах АЗРФ ведутся недостаточно широко. К пунктам регулярного контроля можно отнести лишь пять участков вблизи поселков Игарка, Тикси, Черский, Жиганск и на о. Самойловский.

Заинтересованные в эффективности своей деятельности предприятия и компании земле- и недоропользователей, а также муниципалитеты ведут объектный геотехнический мониторинг (ГТМ), включая наблюдения за многолетнемерзлыми породами. Однако далеко не все осознают необходимость ГТМ. Кроме того, системным недостатком ведомственного ГТМ в отношении мерзлоты является то, что их режимная сеть охватывает исключительно зоны непосредственного воздействия инженерных объектов и не содержит площадок для контроля фонового состояния ММП.

Составной частью мониторинга являются не только наблюдения, но и анализ всех доступных данных, прежде всего по основаниям зданий и сооружений, а также разработка технических решений по инженерной защите объектов хозяйственного и социального назначения на основе управления несущей способностью фундаментов с помощью методов регулирования. Без разработки таких решений наблюдения в большой мере теряют свое значение. Неотъемлемым требованием во всех этих мероприятиях является природоохранный компонент.

Необходимо прийти к пониманию, что и фоновый, и геотехнический мониторинг ММП в целом должны быть частями единой структуры государственного межведомственного мониторинга криолитозоны [Дроздов, Дубровин, 2016]. Фоновый мониторинг выполняется в ненарушенных природных условиях на специальных стационарах и площадках с периодическим посещением и охватывает по возможности все многообразие ландшафтных и мерзлотных условий криолитозоны. Геотехнический мониторинг проводится на территории промышленной и гражданской застройки.

Фоновый мониторинг важен для понимания общих и региональных тенденций развития криолитозоны. Геотехнический мониторинг решает конкретные задачи обеспечения устойчивости и надежности эксплуатации зданий и сооружений и обеспечивает всестороннюю информационную основу для разработки нормативных документов. Иными словами, под геотехническим мониторингом природно-технических (геотехнических) комплексов следует понимать систему контроля, прогнозирования и управления их состоянием для обеспечения эксплуатационной надежности объектов экономики на всех стадиях жизненного цикла с соблюдением экологической безопасности.

Пионером в организации ведомственной системы ГТМ в нефтегазовой отрасли является ПАО «Газпром», где раньше других была осознана необходимость внедрения в производственную деятельность комплексной системы управления состоянием ГТС, возведенных на мерзлых основаниях (еще в 2003 г. разработана и реализована комплексная программа для обеспечения надежности эксплуатации инженерных сооружений в зоне распространения ММП). Действующий норматив «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» [СП 25.13330.2012, 2012] предполагает проведение геотехнического мониторинга, но не дает конкретных рекомендаций по его организации.

Как и в других отраслях, главным недостатком существующей системы ГТМ на всех объектах нефтегазовой отрасли является отсутствие в составе режимной сети ГТМ фоновых площадок для контроля температурного режима ММП, динамики экзогенных процессов, гидрологического и гидрогеологического режимов территории, состояния напочвенных покровов и других важных показателей состояния геосистем криолитозоны в природных, ненарушенных условиях. Таким образом, несмотря на организацию геотехнического мониторинга на объектах нефтегазового комплекса, отсутствует одновременное фоновое мониторинга снижает эффективность и того и другого. Аналогичная однобокость в наблюдениях характерна и для муниципалитетов, которые ведут мониторинг мерзлоты в своих населенных пунктах (Якутск, Салехард). И главное – не существует единого центра сбора и анализа геокриологической информации. А это приводит к ситуации, когда научной общественности и обществу в целом, по сути, неизвестно, что в действительности происходит с мерзлотой, особенно на застроенных территориях, в городах и поселках, в основаниях инженерных сооружений.

Сравнение организации геокриологического мониторинга в России и других странах показывает, что северные страны развивают фоновый геокриологический мониторинг на базе научных и

геологических организаций: в США и Канаде – на базе геологических служб, в Швейцарии и Норвегии – на базе университетов по государственной программе, в КНР – на базе Академии наук совместно с производственными предприятиями.

Обеспечение надежной несущей способности оснований методами регулирования

При строительстве на многолетнемерзлых грунтах используемые в настоящее время методы могут эффективно обеспечивать устойчивость только в течение определенного времени, так как они учитывают особенности состояния окружающей среды до строительства (включая климатические и гидрологические условия). Имеется два способа управления механическим взаимодействием сооружений с мерзлыми основаниями: конструктивный, при котором обеспечиваются пределы напряженного состояния, деформаций и ползучести мерзлого грунта, льда и материала сооружений; теплотехнический, при котором температурный режим оснований и материала сооружений поддерживается в пределах, обеспечивающих их достаточную прочность. Эти способы, как правило, применяются одновременно [Достовалов, Кудрявцев, 1967; Цытович, 1973]. Существует также два основных метода, используемых для строительства на многолетнемерзлых грунтах. Так называемый I принцип предполагает сохранение многолетнемерзлых грунтов в естественном состоянии в течение всего срока службы здания или сооружения. Этот метод используется в областях прерывистого или сплошного распространения ММП. Принцип II предполагает оттаивание многолетнемерзлых грунтов до начала или во время строительства. Этот метод используется в

основном в районах островного распространения мерзлоты.

В большинстве зданий, построенных по I принципу, имеется проветриваемое (вентилируемое) подполье, которое обеспечивает сохранение температурного режима мерзлых грунтов. Высота подполья в России для зданий на вечномерзлых грунтах, по [СП 25.13330.2012, 2012], должна приниматься с условием обеспечения его вентиляции, но не менее 1.2 м от поверхности грунта в подполье до низа выступающих конструкций перекрытия. В таких случаях, как правило, используют свайный фундамент (рис. 2) [Вялов, Городецкий, 1984; Ladanyi, 1984]. Сваи вморожены в вечную мерзлоту и могут выдерживать, прежде всего за счет боковой поверхности смерзания, большие нагрузки, если их проморозить до установки. Сложность обслуживания вентилируемых подполий зданий в том, что они могут заноситься снегом и увлажняться при отсутствии надлежащего дренажа.

В последнее время эксплуатация объектов, построенных по I принципу, осложняется климатическими факторами. За прошедшие 30–40 лет периода климатических изменений несущая способность мерзлых грунтов основания сооружений, например, в Западной Сибири снизилась за счет потепления на 5–30 %, причем пояс максимального снижения несущей способности проходит примерно по линии Салехард–Надым–Новый Уренгой–Норильск. Это область нефтегазового освоения территорий в конце XX в., и все построенное здесь в то время находится в условиях риска, поскольку запас прочности по грунту уже исчерпан [Streletskiy et al., 2019].



Рис. 2. Здание общежития на железобетонных сваях в зоне сплошного распространения ММП в пос. Харасавэй, п-ов Ямал.

Фото А.Б. Осокина.

И природные, и техногенные изменения температуры мерзлых грунтов требуют компенсации. С 1950-х гг. на Аляске и в России [Ганеев, 1969; Long, 1966] стали внедрять так называемые термосифоны или сезонноохлаждающие установки (СОУ). СОУ действует по принципу естественной циркуляции в металлической трубе теплоносителя, охлаждающегося в зимнее время на поверхности. Первоначально для этого использовался керосин, позднее углекислота или аммиак. Сейчас все большее распространение получают термосваи – сваи со встроенным термосифоном. За несколько лет вокруг сваи происходит понижение температуры грунтов на несколько градусов, но на небольшом расстоянии от нее (до 1.5 м). При применении термосвай должна учитываться возможность вторичного пучения мерзлых грунтов при их дополнительном охлаждении. Известны случаи повреждения некоторых сооружений, например, спорткомплекс в центре Якутска и компрессорная станция на газопроводе Ямал–Центр. Тем не менее сегодня термосифон (термостабилизатор) – важная часть многих проектов в криолитозоне (рис. 3).

Вентиляционные каналы – один из самых давно известных и широко используемых способов охлаждения основания насыпей и других отсыпок [Рекомендации..., 1985]. В тело насыпи закладываются водопропускные трубы или воздуховоды диаметром 0.5–1.0 м, которые пропускают холодный зимний воздух (летом воздуховоды заглушены). В КНР, в Тибете, этот метод используется помимо транспортных насыпей для аэродромных сооружений; в Канаде, в Инувике, – для охлаждения оснований нефтяных резервуаров и сопутствующих сооружений. Для охлаждения основания и склона насыпей также применяются каменные наброски [Минайлов и др., 1985; Аштинз,

1989] и затеняющие козырьки [Кондратьев, 2013]. Последнее значительно улучшило охлаждение насыпи железной дороги Томмот–Кердем и проблемного участка БАМа на 1841-м километре.

Примеры поддержания надежности несущей способности оснований методами регулирования

Из рассмотренных выше методов, вероятно, наиболее эффективно использование термостабилизаторов, что особенно часто встречается в эксплуатационной практике. Рассмотрим некоторые примеры.

В г. Норильске, район Талнах, деформирующееся в результате повышения температуры грунтов жилое здание было стабилизировано с помощью вертикальных термостабилизаторов. В условиях общего потепления и фильтрации подземных вод температура основания здания к началу 2020 г. достигала +1.4 °С. Заработавшая система температурной стабилизации за зимний период 2020/21 г. понизила температуру грунтов непосредственно под фундаментом до –7.2 °С (по данным “Фундаментстройаркос”).

В г. Надыме в 1990–2000-х гг. были подвержены деформациям примерно 15 зданий (5–7 % от общего количества капитальных сооружений в городе), что обусловливалось неравномерной осадкой фундаментов вследствие оттаивания сильнольдистых грунтов в их основании. Четыре жилых многоэтажных дома, получивших недопустимые повреждения, были демонтированы. Несущую способность мерзлого основания двух жилых домов, снизившуюся из-за теплового воздействия, удалось восстановить путем принудительного промораживания с использованием парожидкостных термостабилизаторов. Еще у двух зданий несущая способность грунтов оснований зданий

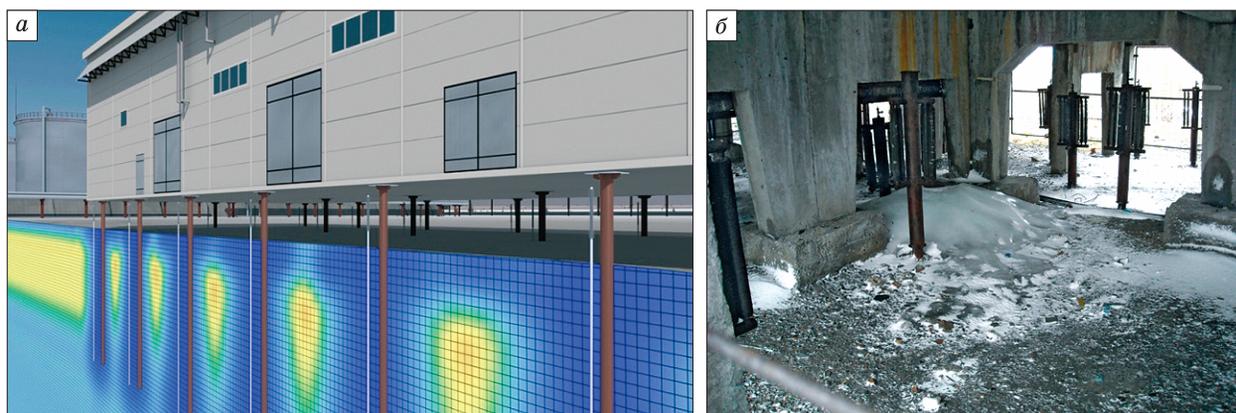


Рис. 3. Термостабилизаторы, используемые для понижения температуры основания сооружения в криолитозоне:

а – по периметру здания (*вверху* – вид здания; *внизу* – схема понижения температуры грунтов термостабилизаторами: желтый цвет – положительные температуры, синий – отрицательные); *б* – термостабилизаторы под зданием.

была восстановлена посредством закачки цементного раствора (по данным А.Б. Осокина).

В пос. Амдерма испытало осадку здание дизельной котельной СМУ, построенной по II принципу (на протерозойских трещиноватых сланцах на ленточном фундаменте без проветриваемого подполья). Применение около 10 простейших, заполненных дизельным топливом термосифонов позволило частично проморозить основание, обеспечить его стабилизацию и предотвратить дальнейшее развитие деформаций.

Обеспечение надежности несущей способности оснований зданий и сооружений методами резервирования

При проектировании инфраструктуры Бованенковского НГКМ (ПАО “Газпром”) производилась оптимизация размещения кустовых площадок газовых скважин на базе районирования территории по геокриологическим условиям. По понятным причинам резервирование надежности оснований и фундаментов с поправкой на потепление – это дополнительные капитальные вложения в объекты строительства. Однако позитивный эксплуатационный эффект заставил сделать требование “о резервировании надежности оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах с поправкой на потепление” типовым в Газпроме при разработке технических заданий на проектирование нового строительства и реконструкцию. Достигается резервирование надежности оснований и фундаментов не только за счет конструктивных особенностей фундаментов (глубина погружения свай, способ погружения и диаметры используемых свай), но и главным образом за счет применения систем термостабилизации. Расчетный температурный режим многолетнемерзлых грунтов оснований обосновывается при проектировании объектов посредством моделирования с использованием специализированных программных продуктов, реализующих нестационарные численные методы расчета, учитывающие прогнозный тренд температуры атмосферного воздуха. К сожалению, применяемые в газовой промышленности подходы пока не нашли своего продолжения в других отраслях.

Экономическая эффективность защитных мероприятий

При строительстве скважин на месторождении ПАО “Газпром” использовано комплексное теплотехническое решение, обеспечивающее сохранение вмещающих скважины пород в многолетнемерзлом состоянии. Опыт первых лет эксплуатации продемонстрировал, что реализованные технические решения себя оправдывают. Кроме того, термостабилизация устьевых зон скважин позволила уменьшить расстояние между

скважинами в кусте с традиционных 40 м до 20–15 м, что существенно (до 30 %) снизило затраты на обустройство кустовых площадок [Мельников и др., 2019].

Другой пример – использование термостабилизаторов при прокладке линий электропередач. Это позволяет сократить длину свай для фундамента опор. Например, при обустройстве Лодочного месторождения (Красноярский край, 130 км западнее Игарки) сэкономлено около 20 млн руб. (или 26 %) за счет затрат на фундаменты опор.

Однако, несмотря на явную эффективность использования термостабилизаторов, показатели отказов их в условиях криолитозоны пока достаточно высокие (для СОУ до 20–30 %) [Стрижков, 2015]. Они выходят из строя из-за коррозии, повреждений при эксплуатации, заводских дефектов. Для повышения надежности работы сезонно действующих охлаждающих устройств целесообразны технологический аудит предприятий-изготовителей СОУ и повышение конкуренции среди производителей.

Альтернативой термостабилизаторам и морозильным агрегатам является применение тепловых насосов [Колосков, Гамзаев, 2021]. В тепловом насосе конденсатор представляет теплообменный аппарат, выделяющий теплоту для нужд потребителя (например, для отопления зданий), а испаритель – теплообменный аппарат, отбирающий тепло у грунтового массива. Использовать тепловые насосы при строительстве в криолитозоне предлагалось за рубежом [Stenbeck-Nielson, Sweet, 1975] и в России [Перльштейн и др., 2000]. Технико-экономическая эффективность использования тепловых насосов определяется плотностью тепловых потоков, поступающих к испарителю в процессе охлаждения грунтов [Кибл, 1983]. Применение тепловых насосов заложено, в частности, в основу технического решения для малоэтажной застройки по программе переселения в г. Воркуту жителей из близлежащих поселков. Планируется возведение 40 таких домов с системой отопления и термостабилизации основания, что позволит оптимизировать строительство по срокам и надежности [Колосков, Гамзаев, 2021]. Конкретный расчет экономической эффективности использования тепловых насосов в криолитозоне был выполнен Г.З. Перльштейном в 2012 г. для условий г. Якутска [Отчет..., 2012] и показал, что в итоге годовая экономия на одно здание может составить примерно 41 тыс. руб. Однако широкого распространения тепловые насосы пока не получили.

Оценка стоимости адаптации жилищного фонда к меняющимся инженерно-геокриологическим условиям на примере г. Норильска

Апробация предлагаемого подхода к оценке стоимости обеспечения устойчивости зданий на

крупном объекте в криолитозоне выполнена на примере городского округа Норильска. Согласно прогнозам [Мельников и др., 2021], максимальный ущерб при умеренном сценарии потепления и сложившихся приемах хозяйствования достигнет в Норильске примерно 600 млрд руб. к началу второй половины XXI в. При этом, по оценкам авторов, совокупная стоимость зданий и сооружений в ценах 2020 г. на территории городского округа составляет 631 млрд руб. (из них: 117 млрд руб. – стоимость жилищного фонда, 514 млрд руб. – стоимость зданий и сооружений производственной сферы, т. е. таких ключевых секторов, как промышленность, сельское и лесное хозяйство, строительство, транспорт, секторы рыночных и нерыночных услуг). Для понимания масштаба вероятного ущерба следует отметить, что бюджет Норильска на 2020 г. составлял всего 20.6 млрд руб. (лишь 61 % из них – собственные доходы).

Стоимость термостабилизации складывается из издержек на изготовление, транспортировку и строительно-монтажные работы по установке термостабилизаторов. Подбор их количества и геометрического расположения выполняется по результатам теплотехнического моделирования. По усредненным оценкам, в зоне сплошного распространения ММП в среднем для поддержания двух свай жилого дома необходим один термостабилизатор [Гамзаев, Кроник, 2016]. Количество свай на единицу площади здания определяется его конструктивными особенностями. Например, для 2-этажного жилого вахтового комплекса на 850 человек на Ванкорском месторождении в Краснояр-

ском крае (по данным НПО “Фундаментстрой-аркос” [Волкова, 2021] и др.) необходимо 12 термостабилизаторов на 100 м² площади объекта. В среднем, по данным НПО “Фундаментстройаркос”, один средний термостабилизатор обеспечивает площадь замораживания ~4 м² [Аникин и др., 2013], и, следовательно, на указанном объекте промораживается примерно половина площади его основания.

Удельная стоимость стабилизации 1 м² замороженного грунта в плане здания составляет от 10 до 80 тыс. руб./м². Такой разброс цен связан с техническими решениями и расценками в зависимости от категории грунтов и глубины бурения. В работе [Светлышев, 2018] приведен пример 9-этажного 4-подъездного жилого дома из сборных железобетонных конструкций с железобетонным монолитным ленточным фундаментом в Надыме (размеры здания 101.0 × 14.4 м). По данным автора, издержки на устройство системы термостабилизации грунтов, т. е. дальнейшее применение I принципа строительства, составили 47 млн руб. Из них: температурная стабилизация грунта – 19 млн руб., аварийно-восстановительные работы по ремонту фундамента и несущих конструкций – 28 млн руб. при стоимости строительства здания-аналога в сопоставимых ценах – 127 млн руб.

Исходя из структуры жилищного фонда Норильска (см. таблицу), авторами были рассчитаны средние площади оснований жилых домов различных серий. Приблизительная стоимость систем термостабилизации определялась из расчета

Стоимость термостабилизации жилищного фонда г. Норильска

Тип строения	Кол-во строений	Совокупная площадь оснований домов, м ²	Кол-во этажей	Оценочная стоимость термостабилизации*, млн руб.	
Дома по проектам 1960–1970-х гг.	305	334 601	5	3346	26 768
К-69	62	95 828	9	958	7666
Серия-84	255	257 675	9	2577	20 614
Серия 111–112	140	153 592	9	1536	12 287
НК-12	15	21 553	12	216	1724
Дома по проектам 1930–1950-х гг.	44	91 379	5	914	7310
Дома гостиничного типа**	12	14 584	9	146	1167
Кирпичные многоквартирные дома в пос. Снежногорск	6	7389	5	74	591
Общежития, всего	26	30 809	–	308	2465
В том числе:					
общего типа (5-эт.)	8	8955	5	90	716
квартирного типа (9-эт.)	18	21 854	9	218	1749
Итого	865	1 007 410	77	10 075	80 592

* Слева: из расчета 10 тыс. руб. на 1 м² замороженного грунта; справа: из расчета 80 тыс. руб. на 1 м² замороженного грунта.

** Гостинка (дом гостиничного типа) – тип жилого помещения, представляющего собой малометражную однокомнатную квартиру либо комнату с кухонной нишей и санузелом.

10 тыс. и 80 тыс. руб. на 1 м² основания. При этом не учитывались издержки на транспортировку и установку систем. Результаты расчетов представлены в таблице. Из расчета были исключены панельные 9-этажные общежития серии 1-464.Д-82, которые в отличие от остальных подлежат поэтапному сносу и не подвержены ни реконструкции, ни капитальному ремонту.

Таким образом, в первом приближении удалось оценить, что издержки на термостабилизацию жилищного фонда Норильска составят от 10 до 81 млрд руб., в то время как стоимость существующего жилфонда оценена нами в 117 млрд руб. Согласно [Мельников и др., 2021], ущерб жиллому фонду г. Норильска может составить к 2050 г. около 60 млрд руб. Близкие пропорции издержек на предотвращение негативных последствий и величины вероятного ущерба, по-видимому, характерны и для остальных урбанизированных территорий криолитозоны АЗРФ, в зависимости от того, как рано начнут приниматься меры по термостабилизации грунтов оснований фундаментов. Следует подчеркнуть, что поддержание теплового режима оснований необходимо осуществлять не только с помощью термостабилизаторов (надежность которых в будущем надо повысить), но и другими зарекомендовавшими себя методами (прветриваемое подполье) и новыми способами, включая применение тепловых насосов.

ВЫВОДЫ

Современные тенденции состояния многолетнемерзлых пород во многом определяются глобальными климатическими изменениями. По существующим представлениям, потепление климата неизбежно способствует количественному и качественному изменению состояния арктической криолитозоны.

Изменения теплового состояния вечной мерзлоты под влиянием климатических вариаций происходят на протяжении многих лет, но не достигли своего максимума. Это обстоятельство значительно повысило риски в строительстве, земле- и недропользовании, возросли эпидемиологические и экологические угрозы в АЗРФ и криолитозоне в целом. Повсеместно в арктической зоне отмечается потеря несущей способности грунтов оснований зданий и сооружений. Подавляющее большинство данных о состоянии криолитозоны, а также о ее взаимодействии с объектами инфраструктуры нуждается в обновлении и актуализации.

За последние 35–40 лет температура верхней части разреза ММП в естественных условиях повысилась на 0,5–2,0 °С, а на застроенных объектах газовой промышленности равнинах Западной

Сибири – на 2,0–4,0 °С. Несущая способность мерзлых грунтов основания сооружений при этом только за счет природных изменений снизилась на 5–30 % в зависимости от местных геокриологических условий.

Техногенез существенным образом дополняет воздействие фоновых климатических изменений. В результате совместного влияния потепления климата и крупномасштабных техногенных воздействий на ММП возникает кумулятивный эффект, последствия которого уже в настоящее время приводят к потере устойчивости мерзлых оснований, крупным авариям природно-технических систем, экологическим катастрофам и в целом к возрастанию риска природопользования в осваиваемых районах криолитозоны.

Для экономически оправданного реагирования на происходящие изменения должна быть создана система государственного мониторинга вечной мерзлоты, включающая фоновые геокриологические наблюдения и объектный геотехнический мониторинг с единой системой накопления информации и прогнозирования. Это существенно снизит риски хозяйствования в криолитозоне и поможет решению вопросов планирования и оценки эффективности проектных решений и защитных мероприятий. При этом стоимость защитных мероприятий, в частности термостабилизации, оказывается на порядок ниже возможного ущерба в случае ее отсутствия, и, таким образом, эффективность этих мероприятий оказывается достаточно высокой.

Представляется обоснованным и подлежащим распространению подход к проектированию объектов капитального строительства в криолитозоне, предполагающий резервирование надежности оснований и фундаментов за счет применения термостабилизации и других методов, компенсирующих прогнозируемое снижение несущей способности многолетнемерзлых грунтов, вызываемое климатическими и техногенными факторами. При относительно невысоком объеме дополнительных капитальных вложений (несколько процентов от стоимости строительства) резервирование надежности обеспечит устойчивость и механическую безопасность объектов.

Благодарности. *Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР ИГЭ РАН по теме НИР АААА-А19-119021190077-6; государственного задания ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № 121042000078-9; договора между ФАНУ “Востокгосплан” и ФТБУ “Гидроспецеология” № К-26092/1-1-2020; направления поисковых и фундаментальных исследований СО РАН 1.5.12. Криосфера Земли и ее пространственно-временная эволюция; при поддержке администрации ЯНАО.*

Литература

- Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А.** Расчет динамики промерзания грунта под воздействием одиночного термосифона // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 51–55.
- Ашпиз Е.С.** Оценка надежности работы насыпей, сооружаемых по II принципу использования вечномерзлых грунтов в качестве основания // Межвуз. сб. науч. тр. М., МИИТ, 1989, вып. 823, с. 27–30.
- Березняков А.И.** Проблемы устойчивости добывающих скважин месторождений полуострова Ямал / А.И. Березняков, Г.И. Грива, А.П. Попов и др. М., ИРЦ Газпром, 1997, 159 с.
- Брушков А.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А. и др.** Геокриологический мониторинг: для чего он нужен и как проводится. Часть II // Наука: Экология, 19 мая, 2021. – URL: <https://goarctic.ru/regions/geokriologicheskij-monitoring-dlya-chego-on-nuzhen-i-kak-provoditsya-chast-ii/>
- 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.
- Волкова Е.В.** Результаты сравнения геокриологического мониторинга систем температурной стабилизации грунтов оснований различных производителей. Тюмень, ООО НПО “Фундаментстройаркос”, 2021. – URL: <https://www.npo-fsa.ru/rezultaty-sravneniya-geokriologicheskogo-monitoringa-sistem-temperaturnoy-stabilizacii-gruntov-0>
- Вялов С.С.** Термосваи в строительстве на Севере / С.С. Вялов, С.Э. Городецкий. Л., Стройиздат, 1984, 146 с.
- Вялов С.С.** Проблемы фундаментостроения на вечномерзлых грунтах // Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1992, с. 5–13.
- Гамзаев Р.Г., Кроник Я.А.** Системы термостабилизации грунта при строительстве в криолитозоне // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, с. 245–252.
- Гапеев С.И.** Укрепление мерзлых оснований. Л., Стройиздат, 1969, 104 с.
- Геокриология СССР.** Восточная Сибирь и Дальний Восток / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 515 с.
- Достовалов Б.Н.** Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 404 с.
- Дроздов Д.С., Дубровин В.А.** Геоэкологические проблемы нефтегазового недропользования в Российской Арктике // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 4, с. 16–27.
- Кибл Дж.** Применение и экономика тепловых насосов // Энергия окружающей среды и строительное проектирование / Под ред. В.Н. Богославского, Л.М. Махова. М., Стройиздат, 1983, с. 56–65.
- Колосков Г.В., Гамзаев Р.Г.** К вопросу выбора оптимальных систем термостабилизации грунтов при строительстве в криолитозоне // Геотехника, 2015, № 6, с. 4–11.
- Кондратьев В.Г.** Охлаждение массива многолетнемерзлых грунтов в основании дорог путем регулирования потоков холода и тепла // Грунтоведение, 2013, № 1, с. 34–47.
- 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 // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2021, № 1, с. 14–31, DOI: 10.31857/S0869780921010070.
- Мельников В.П., Трофимов В.Т., Орлов В.П. и др.** Принятие доктрины изучения и охраны “вечной мерзлоты” – необходимый элемент стратегии развития АЗРФ // Материалы конф. “Актуальные проблемы геокриологии” (Москва, 15–16 мая 2018 г.). М., Унив. книга, 2018, т. 1, с. 5–19.
- Мельников И.В., Нерсесов С.В., Осокин А.Б. и др.** Гео-технические решения для строительства газовых скважин в особо сложных геокриологических условиях полуострова Ямал // Газ. пром-сть, 2019, № 12 (794), с. 64–72.
- Минайлов Г.П., Меренков Н.Д., Перетрухин Н.А. и др.** Рекомендации по устранению деформаций и повышению устойчивости земляного полотна в сложных мерзлотно-грунтовых условиях. М., ЦНИИС Минтрансстроя, 1985, 50 с.
- Осокин А.Б.** Многолетние изменения среднегодовой температуры ММП на севере Западной Сибири под воздействием потепления климата // Материалы Четвертой конф. геокриологов России. М., Унив. книга, 2011, т. 3, с. 69–77.
- Отчет** о научно-исследовательской работе по теме: Выполнить математическое моделирование температурного поля и напряженно-деформированного состояния намывных грунтов в основании подземных паркингов, оборудованных тепловыми насосами. Спрогнозировать влияние строительства на окружающие сооружения для объекта “застройки квартала № 203 г. Якутска”. Якутск, ИГЭ РАН, 2012, 91 с.
- Перльштейн Г.З., Гулый С.А., Буйских А.А.** Повышение несущей способности мерзлых грунтов с помощью тепловых насосов // Основания и фундаменты, 2000, № 3, с. 26–31.
- Рекомендации** по проектированию пространственных вентилируемых фундаментов на вечномерзлых грунтах. М., НИИОСП, 1985, 38 с.
- Ремизов В.В., Чугунов Л.С., Попов А.П. и др.** Динамика температурного режима грунтов оснований объектов подготовки газа месторождений севера Тюменской области // Подготовка и переработка газа и газового конденсата: Обзорная информация. М., ИРЦ Газпром, 1997, 70 с.
- Светлышев Д.А.** Деформации зданий и сооружений в криогенной зоне Западной Сибири. Челябинск, ЮУрГУ, 2018, 69 с.
- СП 25.13330.2012.** Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М., 2012. –URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095519> (дата обращения: 28.08.2021).
- Стрижков С.Н.** Повышение надежности геотехнических систем с использованием сезонно-действующих охлаждающих устройств // Геотехника, 2015, № 6, с. 34–41.
- Цытович Н.А.** Механика мерзлых грунтов. М., Высш. шк., 1973, 448 с.
- Esau I., Miles V., Varentsov M. et al.** Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate // Theoret. and Appl. Climatology, 2019, vol. 137, iss. 3–4, p. 2513–2528.
- Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation** – ensuring services in an uncertain future. (Anon). London, Royal Acad. Eng., 2011, 107 p.
- Ladanyi B.** Design and construction of deep foundations in permafrost: North American practice // Permafrost: 4th Intern. Conf., Fairbanks, Alaska. Washington, DC, Nat. Acad. Press, 1984, p. 43–50.
- Larsen J.N., Anisimov O.A., Constable A. et al.** Polar regions // Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2014, p. 1567–1612.

Long E.L. The long thermopile // *Permafrost Intern. Conf.* (Lafayette, Indiana, November 11–15, 1966). Washington, DC, Nat. Acad. Sciences – Nat. Res. Council, 1966, p. 487–491.

Shiklomanov N., Streletskiy D., Suter L. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // *Polar Geography*, 2019, No. 42, p. 267–286. – <https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1686082>

Stenbeak-Nielson H.C., Sweet L.R. Heating with ground heat: an energy saving method for home heating // *The Northern*, 1975, vol. 7, No. 1, p. 20–25.

Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: a GIS-based landscape approach to geotechnical modeling // *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 2012, No. 44, p. 368–380. – <http://doi.org/10.1657/1938-4246-44.3.368>

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 // *Environ. Res. Lett.*, 2019, No. 14, p. 025003. – <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5e6>

Zimmerman K.O. (Ed.). *Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change* // *Proc. of the Global Forum 2010*. New York, Springer, 2011, 463 p.

References

Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Calculation of soil freezing rate under the influence of a solitary thermosyphon. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2013, vol. XVII, No. 1, p. 51–55 (in Russian).

Ashpiz E.S. Assessment of reliability of operation of embankments constructed according to the II principle of use of permafrost soils as a base. In: *Mezhvuz. sbornik nauch. trudov [Inter-university Collection of Scientific Works]*. Moscow, MIIT, 1989, vol. 823, p. 27–30 (in Russian).

Bereznjakov A.I., Griva G.I., Popov A.P. et al. Problemy ustojchivosti dobyvajushchikh skvazhin mestorozhdenij poluostrova Jamal [Problems of Stability of Production Wells in Yamal Peninsula Fields]. Moscow, IRC Gazprom, 1997, 159 p. (in Russian).

Brushkov A.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A. et al. Geocryological monitoring: what is it for and how it is carried out. Part II. *Nauka: Ekologiya [Science: Ecology]*, May 19, 2021. – URL: <https://goarctic.ru/regions/geokriologicheskij-monitoring-dlya-chego-on-nuzhen-i-kak-provoditsya-chast-ii/>

Bryuhoveckij O.S., Drozdov D.S., Lauhin S.A., Yashin V.P. On the share of subsoil use in accumulated environmental damage of the Arctic zone of the Russian Federation. *Izvestiya vuzov: Geologiya i razvedka [News of Universities: Geology and Exploration]*, 2014, No. 6, p. 59–63 (in Russian).

Volkova E.V. Rezul'taty sravneniya geokriologicheskogo monitoringa sistem temperaturnoy stabilizatsii gruntov osnovaniy razlichnykh proizvoditeley [Results of a comparison of geocryological monitoring of temperature stabilization systems for soils of foundations of different manufacturers]. Tyumen, NPO Fundamentstroyarkos, 2021. – URL: <https://www.npofsa.ru/rezultaty-sravneniya-geokriologicheskogo-monitoringa-sistem-temperaturnoy-stabilizatsii-gruntov-0>

Vyalov S.S., Gorodeckij S.E. Termosvai v stroitel'stve na Severe [Thermal Seedlings in Construction in the North]. Leningrad, Strojizdat, 1984, 146 p. (in Russian).

Vyalov S.S. Problems of foundation construction on permafrost soils. In: *Osnovaniya i fundamenti na vechnomerzlyh gruntah [Foundations and Foundations on Permafrost Soils]*. Moscow, Strojizdat, 1992, p. 5–13 (in Russian).

Gamzaev R.G., Kronik Ya.A. Soil thermal stabilization systems during construction in cryolithozone. In: *Proc. of the Fifth Conference of Geocryologists of Russia (Moscow, 14–17 June 2016)*. Moscow, Universitetskaya kniga, 2016, p. 245–252 (in Russian).

Gapeev S.I. Strengthening of frozen foundations. Leningrad, Strojizdat, 1969, 104 p. (in Russian).

Geokriologija SSSR. Vostochnaja Sibir' i Dal'nij Vostok [Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Nedra, 1989, 515 p. (in Russian).

Dostovalov B.N., Kudryavcev V.A. Obshee merzlotovedenie [General Cryology]. Moscow, MGU, 1967, 404 p. (in Russian).

Drozdov D.S., Dubrovin V.A. Environmental problems of oil and gas exploration and development in the Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2016, vol. XX, No. 4, p. 14–25.

Kibl D. Application and economics of heat pumps. In: *Energiya okruzhayushchej sredy i stroitel'noe proektirovanie [Environmental Energy and Construction Engineering]*. Moscow, Strojizdat, 1983, p. 56–65 (in Russian).

Koloskov G.V., Gamzaev R.G. To the issue of selection of optimal systems of thermal stabilization of soils during construction in cryolithozone. *Geotekhnika [Geotechnics]*, 2015, No. 6, p. 4–11 (in Russian).

Kondrat'ev V.G. Cooling of the mass of permafrost soils at the base of roads by regulating cold and heat flows. *Gruntovedenie [Soil and Rock Engineering]*, 2013, No. 1, p. 34–47 (in Russian).

Mel'nikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. et al. 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. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya [Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology]*, 2021, No. 1, p. 14–31 (in Russian).

Mel'nikov V.P., Trofimov V.T., Osipov V.I. et al. Doctrine of study and protection of “permafrost” – a necessary element of the development strategy of the Russian Arctic. In: *Proceedings of the Conference “Modern Problems of Geocryology” (Moscow, 15–16 May, 2018)*. Moscow, Universitetskaya kniga, 2018, vol. 1, p. 5–19 (in Russian).

Mel'nikov I.V., Nersesov S.V., Osokin A.B. et al. Geotechnical solutions for the construction of gas wells in especially difficult geocryological conditions of the Yamal Peninsula. *Gazovaja promyshlennost' [Gas Industry]*, 2019, No. 12 (794), p. 64–72 (in Russian).

Minajlov G.P., Merenkov N.D., Peretruhin N.A. et al. Recommendations to eliminate deformations and increase the stability of the roadbed in difficult permafrost and soil conditions. Moscow, CNIIS, 1985, 50 p. (in Russian).

Osokin A.B. Long-term changes in the average annual MMP temperature in the North of Western Siberia due to climate warming. In: *Proc. of the Fourth Conference of Geocryologists of Russia*. Moscow, Universitetskaya kniga, 2011, vol. 3, p. 69–77 (in Russian).

Report on research work on the topic: Carry out mathematical modeling of the temperature field and the stress-strain state of alluvial soils at the base of underground parking lots equipped with heat pumps. Predict the impact of construction on the surrounding structures for the facility “development of quarter No. 203 of Yakutsk”. Yakutsk, IGE RAN, 2012, 91 p. (in Russian).

Perl'shtejn G.Z., Gulyj S.A., Bujskih A.A. Increasing the load capacity of frozen soils using heat pumps. *Osnovaniya i fundamenti [Supports and Foundations]*, 2000, No. 3, p. 26–31 (in Russian).

- Rekomendacii po proektirovaniya prostranstvennykh ventiliruemyykh fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh [Recommendations for the design of spatial ventilated foundations in permafrost soils]. Moscow, NIIOSP, 1985, 38 p. (in Russian).
- Remizov V.V., Chugunov L.S., Popov A.P. et al. Dynamics of the temperature regime of the soils of the foundations of gas treatment facilities in the north of the Tyumen region. In: Podgotovka i pererabotka gaza i gazovogo kondensata. Obzornaja informacija [Preparation and processing of gas and gas condensate: Overview information]. Moscow, IRC Gazprom, 1997, 70 p. (in Russian).
- Svetlyshev D.A. Deformations of buildings and structures in the cryogenic zone of Western Siberia. Chelyabinsk, YurGu, 2018, 69 p. (in Russian).
- SP 25.13330.2012. Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow, 2012. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095519> (last visited: 28.08.2021).
- Strizhkov S.N. Improving the reliability of geotechnical systems using seasonal cooling devices. Geotekhnika [Geotechnics], 2015, No. 6, p. 34–41 (in Russian).
- Cytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen Soils]. Moscow, Vysshaya shkola, 1973, 448 p. (in Russian).
- Esau I., Miles V., Varentsov M. et al. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate. Theoretical and Applied Climatology, 2019, vol. 137, iss. 3–4, p. 2513–2528.
- Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation – ensuring services in an uncertain future. (Anon). London, The Royal Academy of Engineering, 2011, 107 p.
- Ladanyi B. Design and construction of deep foundations in permafrost: North American practice. In: Permafrost: 4th International Conference, Fairbanks, Alaska. Washington, DC, National Academy Press, 1984, p. 43–50.
- Larsen J.N., Anisimov O.A., Constable A. et al. Polar regions. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 2014, p. 1567–1612.
- Long E.L. The long thermopile. In: Permafrost International Conference (Lafayette, Indiana, November 11–15, 1966). Washington, DC, National Academy of Sciences – National Research Council, 1966, p. 487–491.
- Shiklomanov N., Streletskiy D., Suter L. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. Polar Geography, 2019, No. 42, p. 267–286. – <https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1686082>
- Stenbeck-Nielson H.C., Sweet L.R. Heating with ground heat: an energy saving method for home heating. The Northern, 1975, vol. 7, No. 1, p. 20–25.
- Streletskiy D.A., Shiklomanov N.I., Nelson F.E. Permafrost, infrastructure and climate change: a GISbased landscape approach to geotechnical modeling. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2012, No. 44, p. 368–380. – <http://doi.org/10.1657/1938-4246-44.3.368>
- 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. Environment Research Letters, 2019, No. 14, p. 025003. – <http://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5e6>
- Zimmerman K.O. (Ed.). Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change. Proceedings of the Global Forum 2010. New York, Springer, 2011, 463 p.

*Поступила в редакцию 29 июля 2021 г.,
после доработки – 2 августа 2021 г.,
принята к публикации 26 августа 2021 г.*