



Научная статья

Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне

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}, М.Н.ЖЕЛЕЗНИЯК¹⁰, В.П.МЕЛЬНИКОВ⁵, С.Н.ОКУНЕВ¹¹, А.Б.ОСОКИН¹², Н.А.ОСТАРКОВ¹³, М.Р.САДУРТДИНОВ⁵, Д.О.СЕРГЕЕВ¹⁴, Р.Ю.ФЕДОРОВ⁵, К.Н.ФРОЛОВ⁸✉

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

² НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, АО «НИЦ Строительство», Москва, Россия

³ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

⁴ Российский экономический университет имени Г.В.Плеханова, Москва, Россия

⁵ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

⁶ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

⁷ Гидроспецгеология, Москва, Россия

⁸ Центр компетенций технологического развития ТЭК при Министерстве энергетики РФ, Москва, Россия

⁹ Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчева РАН, Москва, Россия

¹⁰ Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

¹¹ ООО НПО «Фундаментстройаркос», Тюмень, Россия

¹² ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия

¹³ Восточный центр государственного планирования, Москва, Россия

¹⁴ Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, Москва, Россия

Как цитировать эту статью: Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Железняк М.Н., Мельников В.П., Окунев С.Н., Осокин А.Б., Остарков Н.А., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756. EDN IMQTQY

Аннотация. В связи с активным освоением территорий криолитозоны в условиях изменения климата под воздействием естественных и антропогенных факторов возрастают риски снижения устойчивости зданий и сооружений. Основные причины: потеря несущей способности мерзлых грунтов, различные геокриологические процессы, ошибки на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации объектов. В настоящее время одна из главных задач при проведении исследований и промышленных работ в криолитозоне – контроль и при необходимости управление тепловыми процессами в толще вечной мерзлоты, взаимодействующей с сооружениями. В статье анализируется накопленный положительный опыт применения различных технологий на различных стадиях жизненного цикла как гражданских, так и промышленных объектов для устранения и (или) предупреждения их деформации или полного разрушения под влиянием изменения климата. Исследованы методы стабилизации мерзлоты, применяемые в нефтегазовой отрасли при создании промышленной инфраструктуры месторождений, – промораживание (охлаждение) грунтов оснований в процессе строительства на неоднородных основаниях. Рассмотрено решение задач минимизации осложнений при размещении добывающих скважин в условиях криолитозоны Ямальского полуострова на примере нефтегазоконденсатного месторождения и восстановления температурного режима многолетнемерзлых грунтов на участках крановых узлов магистральных газопроводов. Проведена оценка применяемых методов поддержания тепловых режимов производственной и жилой инфраструктуры внутри муниципалитетов, обеспечивающих функционирование топливно-энергетического комплекса Российской Федерации в Арктике. Создание систем термостабилизации в основаниях зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых на многолетнемерзлых грунтах, позволяет в полной мере использовать высокую прочность и малую деформируемость мерзлых грунтовых массивов и обеспечить долгосрочные планы государства по промышленному освоению Арктики.

Ключевые слова: криолитозона; многолетнемерзлые грунты; фоновый мониторинг; геотехнический мониторинг; термостабилизация; эксплуатация объектов

Поступила: 05.07.2023

Принята: 20.09.2023

Онлайн: 03.10.2023

Опубликована: 27.10.2023



Введение. Освоение территорий распространения вечной мерзлоты в условиях меняющегося климата и интенсивных техногенных воздействий связано с риском снижения устойчивости зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения, а также нанесения ущерба окружающей среде [1, 2]. Так, например, протяженность участков трубы, подверженных высокому риску отказа в результате воздействия процессов промерзания-оттаивания и коррозии, на трубопроводе Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО) составляет 2,4 и 6,7 % соответственно [3]. Основные причины общеизвестны: сильное, часто кратное, снижение несущей способности мерзлых грунтов при их некотором нагреве или деградации [4–7]; активизация инженерно-геокриологических процессов; ошибки на всех стадиях жизненного цикла сооружений (от проектирования до эксплуатации) [8, 9].

Действующие при этом физико-химические факторы и механизмы известны и описаны как качественно, так и численно в старых и новейших учебниках. Однако их совместная количественная оценка, необходимая для принятия оптимальных проектных решений, ограничивается практической невозможностью получить все необходимые для расчетов численные параметры с должной детальностью. Это касается не только трудноопределяемых параметров, но и тех, которые измеряются массово, – из-за их высокой пространственной и временной изменчивости. Льдосодержание и температура мерзлых горных пород, а нередко и их состояние (мерзлое/талое) входят в их число. На расстоянии в несколько метров их значения могут различаться в разы [10], не позволяя корректно выделить необходимые для проектирования инженерно-геологические элементы. Неопределенность временной составляющей изменчивости значительно снижает достоверность геокриологического прогноза.

Это ставит актуальную задачу контроля, а в случае необходимости и управления тепловыми процессами в толще вечной мерзлоты, взаимодействующей с сооружениями. При высокой естественной пространственно-временной изменчивости геокриологических условий и многообразии инженерных объектов подойти к решению можно на основе типизации известных и возможных сочетаний природных и технических компонентов природно-технической системы – ПТС [11]. ПТС характеризуются присущими им тепловыми и механическими свойствами и развитием деструктивных процессов, а именно их качественным описанием и численным показателем – средним значением и мерой рассеяния (дисперсия и пределы варьирования). Для адекватного описания ПТС необходим учет происходящих изменений. Этой системой должен быть государственный мониторинг вечной мерзлоты. Чтобы мониторинг был эффективен, он должен представлять собой межведомственную систему, которая включает следующие действия: регулярные наблюдения, сбор, накопление, обработку и анализ информации; оценку динамики вечной мерзлоты как в естественных условиях (фоновый мониторинг), так и на освоенных территориях (геотехнический мониторинг – в части мерзлоты); составление прогнозов изменения криолитозоны под влиянием естественных факторов и техногенеза; разработку методов и нормативов регулирования состояния вечной мерзлоты для рационального использования криогенных ресурсов и устойчивого развития [12].

Фоновый мониторинг вечной мерзлоты должен рассматриваться как межведомственная система долгосрочных наблюдений, сбора, обработки и анализа данных, прогноза состояния криолитозоны в природных условиях [12]. Фоновый геокриологический мониторинг должен отслеживать естественное состояние и пространственно-временную изменчивость условий на фоновых полигонах (привязанная к узлам хозяйствования площадь) и на одном-двух фоновых геокриологических стационарах. Мировой опыт свидетельствует, что столь высокие стандарты фонового мониторинга являются лишь перспективой как за рубежом, так и в России, однако уже имеющиеся фоновые сети и прогнозные геокриологические расчеты позволяют отслеживать сходные актуальные природные закономерности разного пространственного масштаба [13–15].

Геотехнический мониторинг – это комплекс режимных инструментальных наблюдений за состоянием объектов капитального строительства, включая грунтовые массивы в их основаниях, с целью предотвращения развития недопустимых деформаций оснований, фундаментов и других несущих конструкций. В случае расположения объектов строительства в криолитозоне в рамках геотехнического мониторинга осуществляются долгосрочные инструментальные наблюдения за тепловым и влажностным режимами многолетнемерзлых грунтов (ММГ) и грунтов деятельного



слоя на территориях и площадках, вовлеченных в хозяйственную деятельность, за развитием экзогенных мерзлотно-геологических процессов для оценки их динамики и регулирования процессов составления прогноза изменений под влиянием естественных и техногенных факторов. Это обеспечивает надежную экологически безопасную работу инженерных структур на всем протяжении их жизненного цикла.

Опыт освоения арктической зоны и северных регионов в целом представляет собой медленный последовательный переход от «технологии» совершения и последующего исправления инженерных ошибок к технологиям наблюдения, приспособления, прогнозирования и предотвращения непроектных, в том числе аварийных, ситуаций – прежде всего при реализации крупных инвестиционных проектов [16, 17]. Постепенное внедрение в последние десятилетия концепции мониторинга и расширение составляющих прогноза развития геокриологических условий и обстановок ведут к сокращению социальных, экономических и экологических издержек хозяйствования. Реализованные инженерно-технологические решения были как крупными, так и локальными [18, 19], некоторые технические решения рассмотрены в данной статье.

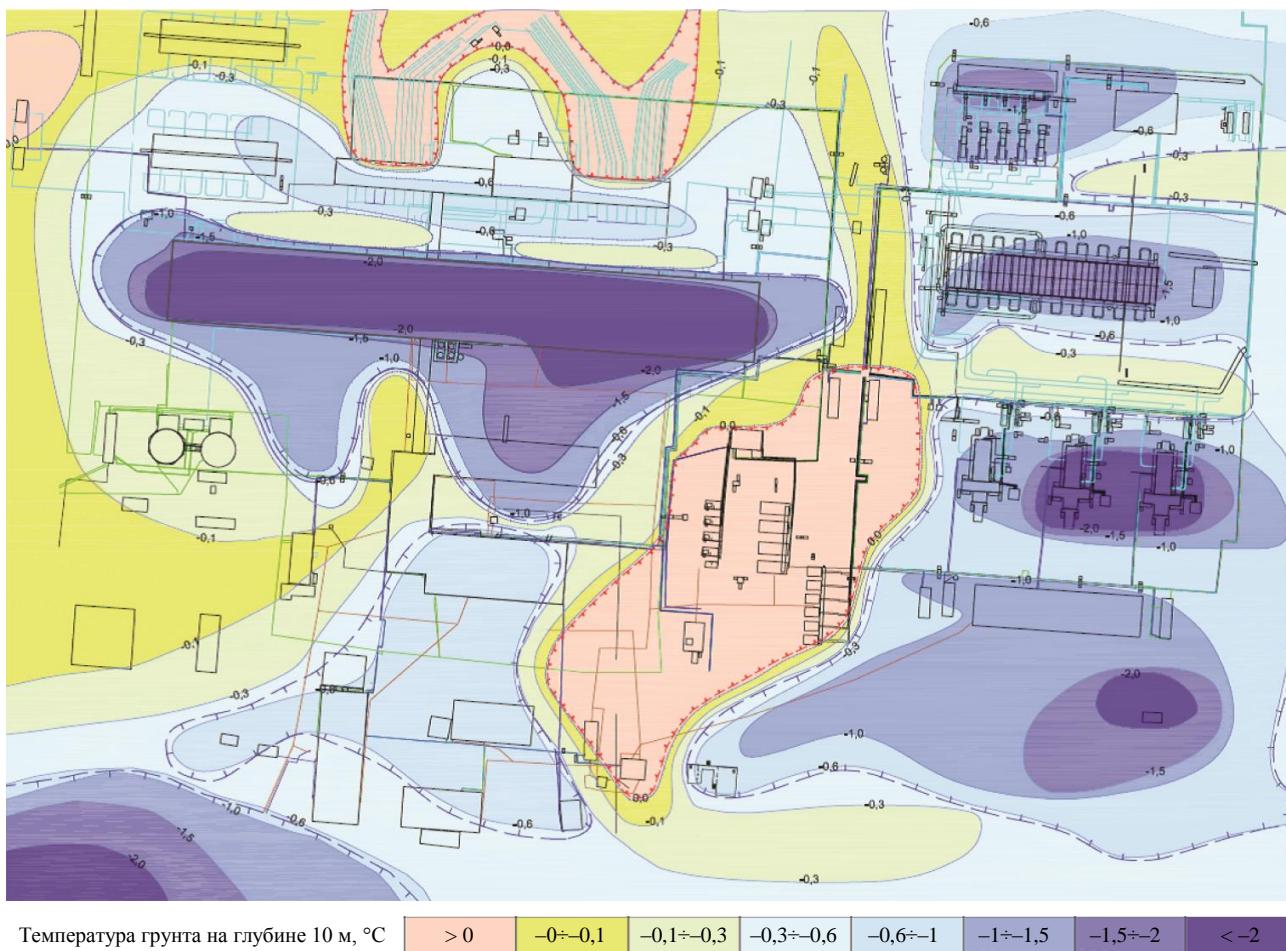
Недоучет мерзлотных условий как системный просчет проектирования объектов капитального строительства в криолитозоне. Опыт эксплуатации объектов капитального строительства на Севере свидетельствует о том, что многие из них, построенные в 1970-1980-е годы без должного геокриологического и геотехнического прогноза, в условиях несовершенной нормативной базы проектирования пришли в недопустимое техническое состояние из-за потери устойчивости оснований и фундаментов, что сопровождалось значительным материальным ущербом.

Отсутствие или пренебрежение материалами опережающих инженерно-геокриологических исследований и картирования, а также режимных мониторинговых наблюдений на территориях месторождений явилось крупным просчетом в обосновании безопасной эксплуатации объектов газовой промышленности в разных регионах западносибирского Севера.

В период освоения месторождений углеводородов Севера Западной Сибири с начала 1970-х и приблизительно до середины – конца 1990-х годов при проектировании оснований и фундаментов на ММГ проектами декларировался I принцип их строительства и использования, однако в значительном числе случаев каких-либо специальных решений, обеспечивающих сохранение грунтов в многолетнемерзлом состоянии и проектный уровень их теплового режима, за исключением вентилируемых подпольй в основаниях зданий, не предусматривалось. Тепловой режим ММГ в основаниях крупных промышленных площадок, на участках размещения разветвленных трубопроводных систем, в приусտевых зонах добывающих скважин, основаниях линейных и иных сооружений формировался под воздействием комплекса случайных факторов, что в условиях прямого и опосредованного теплового воздействия инженерных объектов на застроенных территориях в большом числе случаев приводило к деградации мерзлоты. Проектными организациями допускались и допускаются и явные ошибки. Наиболее типичным примером является ситуация, когда рядом со зданиями и сооружениями, построенными по I принципу, или даже в их пределах, подземным способом прокладывались трубопроводы с положительной температурой циркулирующего продукта. Отдельно следует указать на принятые в массовом порядке в 1970-1980-е годы решения о прокладке в ММГ подземным способом магистральных газопроводов большого диаметра (1020-1420 мм) с положительной температурой газа.

Так, на одном из газовых промыслов Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), введенном в эксплуатацию в 1978 г., за 20 лет на площадке расположения установок комплексной подготовки газа (УКПГ), характеризовавшейся при проведении инженерно-геологических изысканий в 1976 г. сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов с температурой $-2\text{--}3^{\circ}\text{C}$, кровля ММГ оказалась заглубленной на 5-15 м (рис.1). На газопроводе Надым – Пунга недалеко от головной компрессорной сейсмическим мониторингом установлено формирование с 1972 г. чаши оттаивания глубиной 8 м. Это свидетельствует о полном (в ряде случаев) игнорировании геокриологического прогноза в период разработки проекта [20].

Результаты геотехнического мониторинга, проводящегося на месторождении Медвежье, начиная с 1988-1989 гг., свидетельствуют о том, что деформации сооружений носили массовый



Температура грунта на глубине 10 м, °С > 0 | -0÷-0,1 | -0,1÷-0,3 | -0,3÷-0,6 | -0,6÷-1 | -1÷-1,5 | -1,5÷-2 | <-2

Рис.1. Схема геокриологического районирования площадки газового промысла № 9 НГКМ Медвежье (2008)

характер. В 1990-х годах около 20 % свай фундаментов в основаниях технологических корпусов, оборудования и трубопроводов испытывали деформации, различные по характеру и величине. Около 12 % наблюдаемых свай было подвержено деформациям, превышающим принятые для соответствующих сооружений допустимые значения [21]. Сходная ситуация с развитием деформаций газопромысловых сооружений отмечалась на Уренгойском и Ямбургском месторождениях.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что отсутствие на начальных этапах освоения месторождений углеводородов Севера Западной Сибири в 70-е годы прошлого столетия опережающего фонового геокриологического и геотехнического мониторинга, а также геокриологических прогнозов на региональном и объектном уровнях повлекло за собой существенные осложнения в процессе их эксплуатации, а также при эксплуатации систем транспорта газа. Согласно имеющимся данным*, развитие деформаций газопромысловых объектов, построенных в 1970-1980-е годы, явилось причиной 23 % отказа технических систем и 29 % потери добычи газа.

Развитие методов промышленного освоения мерзлоты. Начало 2000-х годов условно можно отнести к началу II этапа освоения северных территорий Западной Сибири, характеризующегося более компетентной разработкой принципиальных технических решений по строительству оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах на основе имеющегося обобщенного опыта, применением новых технологий возведения зданий и сооружений, совершенствованием расчетных методик и развитием нормативной базы проектирования, а также результатов функционирования ведомственных систем геотехнического мониторинга. Одновременно в рамках разработки проектов приоритетным принципом выбора участков размещения крупных технологических

* Каприлов К.Л., Попов А.П. Анализ причин отказов в процессе обустройства и длительной эксплуатации газодобывающих предприятий Крайнего Севера // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. М.: ИРЦ Газпром, 1995. С. 14-20.



объектов стала однородность инженерно-геологических (геокриологических) условий промышленных площадок. Успешный пример реализации этого подхода – генеральный план размещения дожимной компрессорной станции (ДКС) первой очереди на Юбилейном нефтегазоконденсатном месторождении, где в процессе проектирования отказались от первоначальной компоновки объектов (рис.2, *а*) и существенно ее скорректировали (рис.2, *б*). В окончательном варианте генплана основные сооружения ДКС расположены в наиболее благоприятных условиях – на талом основании, а остальные объекты – в относительно однородных мерзлотно-геологических условиях.

В южной геокриологической зоне, характеризующейся прерывистым распространением многолетнемерзлых грунтов, в условиях продолжающегося потепления и деградации мерзлоты наиболее рациональным решением является поиск площадок для строительства, сложенных талыми или преимущественно тальными грунтами.

Ярким примером потребности в гибком режиме управления температурным режимом грунтов служит опыт эксплуатации антенного поля обсерватории Гакона (Центральная Аляска). Основой антенного поля служит гравийная площадка полуметровой толщины, которая расположена в пределах обширной межгорной депрессии бассейна р. Коппер, для которого характерно сплошное распространение высокотемпературной мерзлоты. Межгорная котловина заполнена преимущественно высокольдистыми озерно-ледниковыми отложениями подводных конусов выноса: ленточными глинами, диамиктитами, песками и отложениями лахаров [22]. Среднегодовая температура воздуха в районе Гаконы возросла с $-3,5^{\circ}\text{C}$ в начале 50-х годов XX века до $-1,6^{\circ}\text{C}$ к началу 2000-х. Мерзлая толща имеет безградиентный характер распределения температур в интервале глубин 3-30 м, температура составляет $-0,6^{\circ}\text{C}$. Сезонные колебания затухают на глубине 3 м, что связано с тем, что теплопотоки расходятся на фазовые переходы в массиве грунта. Создание гравийной подсыпки сдвинуло фазовое равновесие и привело к частичному опусканию кровли мерзлоты до 5 м и тепловым просадкам гравийной площадки в 2004 г. Установка сезонных охлаждающих устройств, напротив, повлекла за собой дифференциальное пучение на площадке, которое, так же как тепловая просадка, вторично нарушило устойчивость инженерных конструкций.

Очевидно, что осцилляции климата в будущем будут активно влиять на устойчивость основания и потребуют тонкого управления режимом охлаждения грунта под каждой отдельно взятой конструкцией, состояние которой должно определяться по данным геотехнического мониторинга. Очевидно также, что максимальная однородность инженерно-геокриологических условий должна быть одним из приоритетных требований к размещению крупных геотехнических систем в области распространения вечной мерзлоты [23].

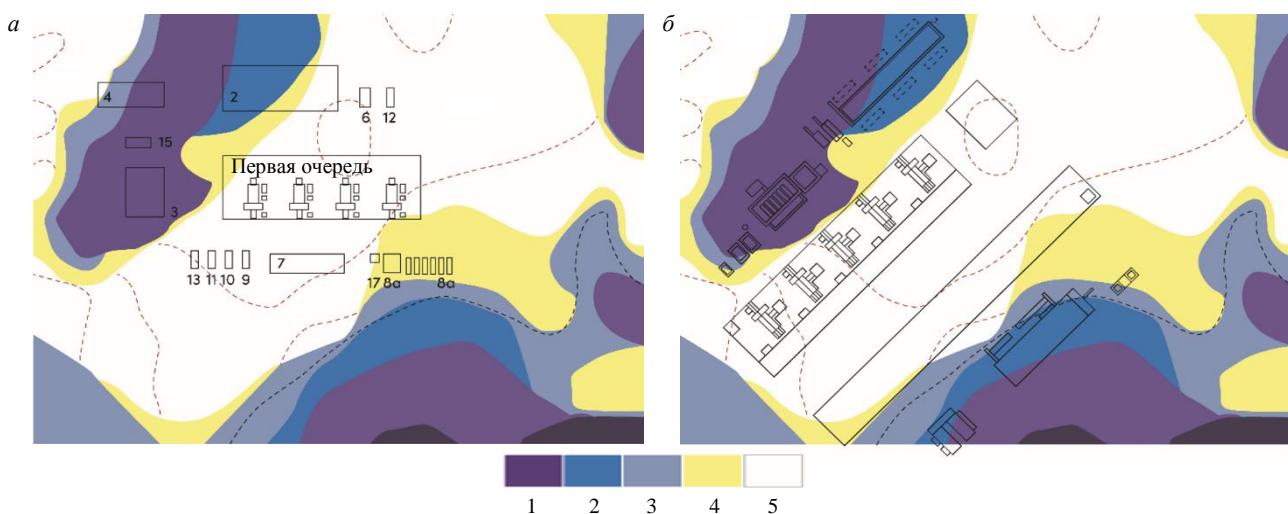


Рис.2. Распространение и температура мерзлых пород на ДКС первой очереди НГКМ Юбилейное:
а – первоначальный вариант генплана; *б* – рабочий вариант

1, 2 – многолетнемерзлые грунты сливающегося типа со среднегодовой температурой $-1\div-2^{\circ}\text{C}$ (1) и $-0,5\div-1^{\circ}\text{C}$ (2);
3 – мерзлые и тальные грунты со среднегодовой температурой около 0°C ; 4 – многолетнемерзлые грунты с кровлей,
заглубленной на 5-9 м; 5 – тальные грунты



Главной новинкой второго периода освоения северных территорий становится активное внедрение в практику строительных и восстановительных работ парожидкостных термостабилизаторов различных конструкций для управления тепловым режимом деградирующих мерзлых грунтов оснований и обеспечения проектного срока эксплуатации объектов капитального строительства.

Цели и ситуации, в рамках которых термостабилизаторы используются для обеспечения необходимого уровня несущей способности, могут быть разными. Среди них необходимо выделить следующие:

- промораживание и понижение температуры талых или пластично-мерзлых грунтов в процессе строительства объектов с целью обеспечения однородных геокриологических условий площадок строительства и уровня несущей способности ММГ, необходимого для передачи нагрузки на фундаменты;
- обеспечение проектного теплового режима многолетнемерзлых грунтов в условиях динамики климатических условий и повышенного снегонакопления в условиях застроенных территорий, нейтрализация тепловой нагрузки от инженерных сооружений в процессе их эксплуатации;
- восстановление теплового режима ММГ в основаниях сооружений, нарушенного вследствие воздействия природно-климатических факторов, ошибочных проектных решений, неправильной эксплуатации инженерных объектов;
- обеспечение проектного теплового режима ММГ в основаниях специфических объектов – гидротехнических сооружений, подземных тепловыделяющих объектов, крупных промышленных зданий без вентилируемых подпольй в основаниях и т.д.

Возможность непосредственного воздействия на тепловое состояние мерзлых грунтов оснований предопределило внедрение объектного геокриологического прогноза для участков размещения зданий, добывающих скважин и других инженерных сооружений, в том числе характеризующихся наличием источников тепла.

Предварительное промораживание (охлаждение) грунтов оснований в процессе строительства на неоднородных основаниях. При размещении крупных промышленных и гражданских объектов на месторождениях Надым-Пурровского междуречья, где распространение ММГ прерывистое, территории застройки нередко имеют резко неоднородные мерзлотно-геологические условия: мерзлоту сливающегося и несливающегося типа, талые грунты. По возможности сооружения локализуют в относительно однородных мерзлотных условиях. Однако это не всегда возможно, примером чего могут служить площадки строительства УКПГ на Юбилейном НГКМ, ДКС на газовом промысле № 6 Медвежьего НГКМ и ряда других объектов. Это потребовало разработки технических решений по промораживанию таликовых зон в контурах ряда сооружений в различных геологических и мерзлотных условиях.

Так, в основании компрессорного цеха ДКС на газовом промысле № 6 Медвежьего месторождения в зоне прерывистой мерзлоты присутствовали суглинистые пластично-мерзлые грунты сливающегося типа, мерзлые грунты с заглубленным положением кровли мерзлых грунтов и талые грунты. Моделирование процесса промораживания грунтов основания проектируемого компрессорного цеха показало, что необходимая термостабилизация теплового поля может быть достигнута в течение трех зимних периодов при погружении в грунты основания трех газоперекачивающих агрегатов и их трубопроводной обвязки 1300 охлаждающих колонок вертикальных естественно действующих систем температурной стабилизации (ВЕТ СТС) (рис.3). Обоснованность данного решения была подтверждена результатами последующего мониторинга.

Осложняющим фактором при таком промораживании является пучение, поскольку температура в пределах вновь образованного мерзлого грунтового массива понижалась в зимний период до $-8 \div -11^{\circ}\text{C}$ (это значительно ниже $-1,5^{\circ}\text{C}$, требуемых для обеспечения необходимого уровня несущей способности грунтов основания ДКС). Однако неравномерного пучения и недопустимых деформаций удалось избежать за счет того, что пучение грунтовых массивов при распределенном импульсе охлаждения от ВЕТ СТС происходило относительно равномерно. В период эксплуатации объекта производительность системы охлаждения оказалась избыточной и была уменьшена посредством расчетного периодического отключения, исключающего «перемораживание» грунтового массива.

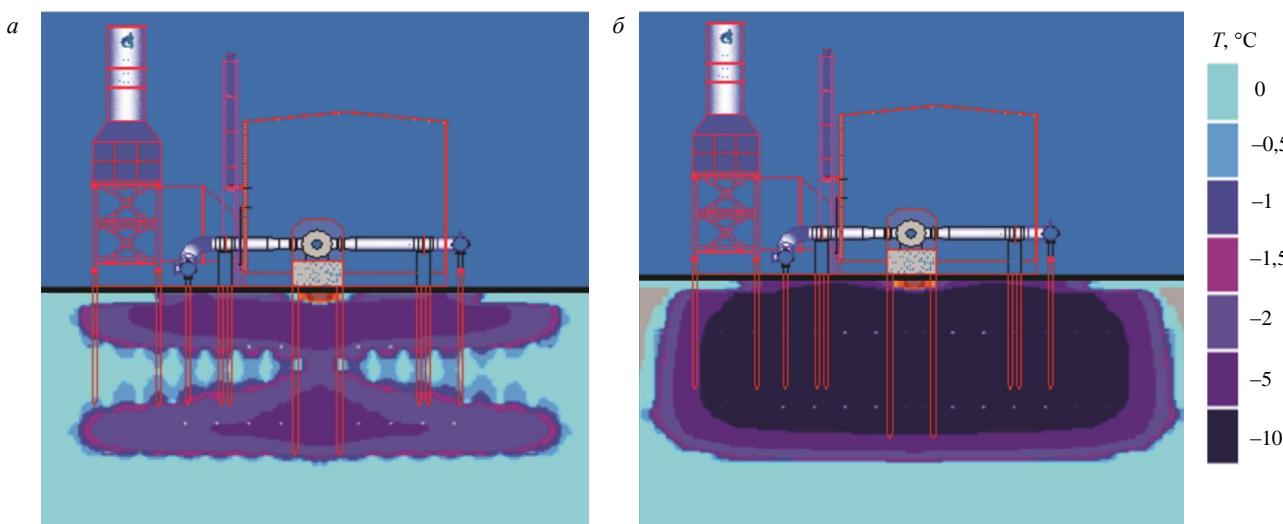


Рис.3. Результаты моделирования теплового режима грунтов основания компрессорного цеха ДКС на ГП № 6 Медвежьего НГКМ: *а* – апрель 2013 г.; *б* – апрель 2015 г.

На территории Бованенковского НГКМ в объединенной пойме крупных рек Се-Яха и Морды-Яха на Центральном Ямале работы по промораживанию грунтов оснований при строительстве инженерных сооружений осуществляются в иных геокриологических условиях – в зоне сплошного распространения ММГ, – оптимальных для строительства. Однако с 80-х годов прошлого столетия фоновые среднегодовые температуры ММГ повысились на ~2-2,5 °С. В результате расчетный уровень несущей способности свайных фундаментов далеко не всегда обеспечивается из-за низких прочностных и деформационных свойств мерзлых, но высокотемпературных и засоленных супесчано-суглинистых грунтов.

При строительстве новых объектов термостабилизаторы погружаются одновременно со сваями. Передача на фундамент полезной нагрузки допускается после достижения температур мерзлых грунтов расчетных значений и успешных испытаний свай нагрузками. Термостабилизаторы остаются и на период эксплуатации объектов для поддержания расчетного температурного режима ММГ в условиях повышенного снегонакопления при плотной застройке промплощадок, наличии тепловых воздействий от инженерных сооружений и фоновой тенденции многолетнего потепления. Очевидно, что при этом продолжительность технологического цикла строительства увеличивается на нескольких месяцев для работы систем тепловой стабилизации грунтов (ТСГ). Для уменьшения задержки в ряде случаев применяют системы ТСГ с принудительным охлаждением в теплый период года с использованием холодильных машин.

Обеспечение проектного теплового режима ММГ устьевых зон скважин. Интенсивное тепловое влияние скважинной продукции на вмещающие многолетнемерзлые грунты сопровождается образованием вокруг ствола скважины талой кольцевой зоны, что приводит к широкому спектру осложнений: просадкам поверхностей площадок размещения скважин, продольным изгибам их обсадных колонн из-за потери устойчивости в зоне оттаивания, нарушению герметичности обсадных колонн, потере устойчивости свайных фундаментов и развитию недопустимых деформаций трубопроводов устьевой трубопроводной обвязки, заколонным газопроявлениям [24, 25].

Минимизация осложнений при размещении добывающих скважин в условиях криолитозоны Ямальского полуострова включает две основные стадии – оптимизацию мест расположения скважин и управление тепловым состоянием многолетнемерзлых грунтов в устьевой зоне скважин [26, 27].

Так, на Бованенковском НГКМ размещение кустов газовых скважин осуществлялось с учетом результатов специализированной геокриологической съемки и районирования по величине просадочности территорий при оттаивании ММГ. Стандартно ММГ на карте размечаются цветами по принципу светофора, раскраска отображает благоприятность/неблагоприятность районов, где красному цвету соответствуют участки водораздельных террас морского и ледово-морского генезиса



с близким залеганием мощных пачек льдистых отложений, подверженных значительной просадочности при оттаивании, а зеленому – благоприятные участки.

На этом основании 8 из 56 кустовых площадок газовых скважин месторождения (т.е. каждая седьмая) перенесены на участки с более благоприятными геокриологическими условиями в пределах, допустимых с точки зрения оптимальной разработки продуктивных пластов. Это исключило наличие в основаниях кустов скважин мощных прослоев высокольдистых отложений и пластовых льдов. Данная процедура признана эффективной и использована в СТО Газпром «Методика проведения геокриологических исследований при разведке и разработке месторождений» (СТО Газпром 2-3.1-233-2008).

Однако зеленых контуров на картах крайне мало, и площадки кустов газовых скважин попадают в лучшем случае в условно благоприятные для строительства и эксплуатации скважин условия. Поэтому проектами на строительство скважин и обустройство месторождения впервые в практике газовой промышленности предусмотрены комплексные решения по температурной стабилизации ММГ в приустьевых зонах добывающих скважин [28]. В качестве технических колонн промысловых скважин вместо обычных насосно-компрессорных труб (НКТ) в конструкции скважин в интервале глубин 0-50 м применены теплоизолированные лифтовые трубы (ТЛТ) с вакуумной теплоизоляцией для ограничения теплового воздействия на породы с избыточной льдистостью [29, 30]. В приустьевых зонах скважин в верхних 15 м предусмотрено строительство ВЕТ СТС для предотвращения оттаивания наиболее льдистого и просадочного интервала ММГ (рис.4) [31].

Десятилетний опыт термостабилизации ММГ в приустьевых зонах скважин на Бованенковском месторождении оправдал себя. Осложнений, связанных с потерей устойчивости крепи скважин, оснований площадок их расположения и фундаментов устьевой трубопроводной обвязки на фоне скважин, где реализованы комплексные решения по термостабилизации, не выявлено.

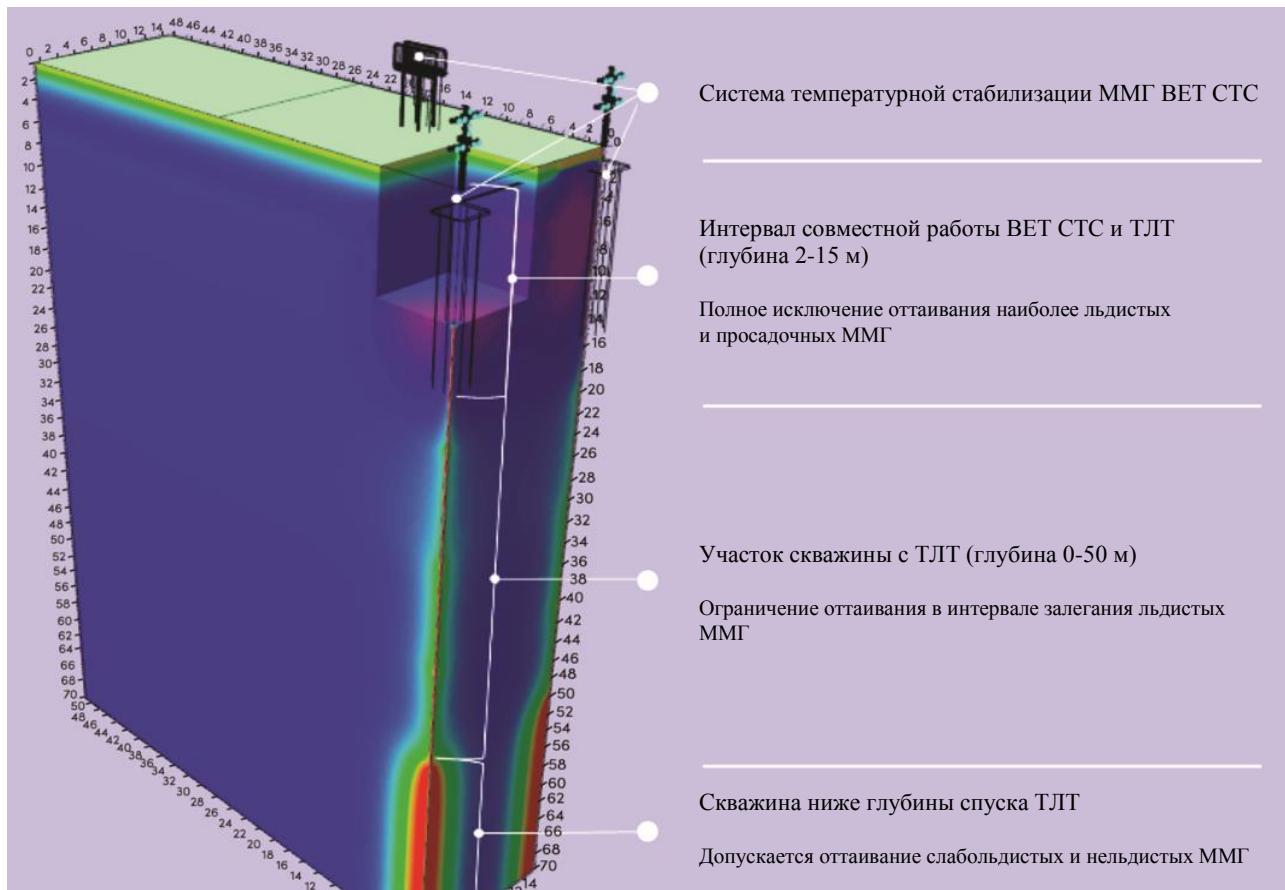


Рис.4. Температурная стабилизация ММГ приустьевых зон газовых скважин
(по данным теплотехнического моделирования ПАО «ВНИПИгаздобыча»)



На Харасавэйском газоконденсатном месторождении, расположенном севернее Бованенковского месторождения в еще менее благоприятных геокриологических условиях, включая большую мощность сильнольдистой толщи, предусмотрен более широкий комплекс термостабилизирующих мер на эксплуатационных скважинах:

- теплоизолированные обсадные трубы направления скважин (термокейсы) с пенополиуретановой теплоизоляцией в интервале глубин 0-40 м;
- парожидкостные сезоннодействующие системы охлаждения в приустьевых зонах с увеличенной относительно Бованенковского НГКМ глубиной спуска (до 40 м);
- теплоизолированные лифтовые трубы с увеличенной глубиной спуска (до 150 м).

Данная комбинация решений выбрана на основании результатов теплотехнических расчетов и расчетов устойчивости крепи скважин согласно СТО Газпром 16-2005.

Восстановление температурного режима ММГ на участках крановых узлов магистральных газопроводов. Деформации крановых узлов газопроводов подключения характерны для газового комплекса региона Надым-Пургского междуречья. В регионе преобладают ММГ прерывистого распространения преимущественно глинистого и песчаного состава, которые в приповерхностной части разреза имеют относительно невысокую льдистость. На участках расположения крановых узлов, где на талых породах и островной мерзлоте использовался II принцип строительства – с оттаиванием мерзлоты, в результате деградации мерзлых грунтов оснований свайные фундаменты кранов начали испытывать разнонаправленные деформации, обусловленные как осадком при оттаивании, так и пучением свай. В ряде случаев это потребовало проведения ремонтных работ с целью ликвидации напряженно-деформированного состояния трубопроводов и восстановления их проектного пространственного положения.

На участках высокотемпературной мерзлоты или заглубленной ее кровли применялась термостабилизация, которая давала положительный эффект уже в первый год своей работы (рис.5) – предотвращалось или приостанавливалось развитие деформаций, обусловленных деградацией ММГ и воздействием сил морозного пучения. Для стабилизации крановых узлов трубопроводы теплоизолировались скорлупами из вспененного пенополистирола толщиной 100 мм.

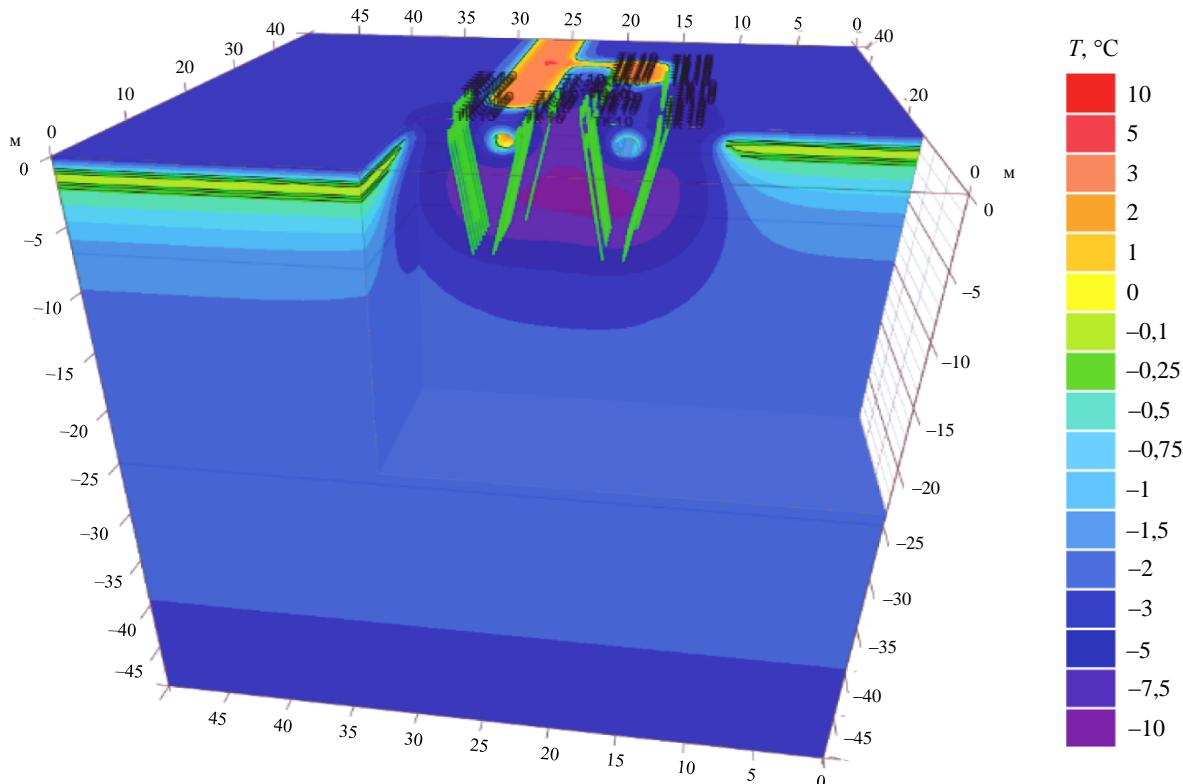


Рис.5. Результаты теплотехнических расчетов для обоснования решений по восстановлению несущей способности мерзлых грунтов основания узла подключения на магистральном газопроводе



В целом опыт эксплуатации крановых узлов магистральных газопроводов после реализации решений по термостабилизации грунтов оснований свидетельствует о прекращении деформаций в течение одного-двух зимних периодов после завершения работ по термостабилизации и обеспечению устойчивости объектов в течение длительного периода (до 20 лет).

Обеспечение устойчивости магистральных газопроводов в условиях п-ова Ямал. Отдельного внимания заслуживают решения, предусмотренные для обеспечения устойчивости магистральных газопроводов большого диаметра (1420 мм) в особо сложных геокриологических условиях п-ова Ямал. С учетом имеющегося негативного опыта, полученного при эксплуатации магистральных газопроводов в Надым-Пур-Тазовском регионе, построенных в условиях распределения ММГ в 1970-1980-е гг., по которым транспортируется газ с положительной температурой с месторождений Медвежье, Уренгойское и Ямбургское, при проектировании газопроводов от месторождений Бованенковское и Харасавэйское на п-ове Ямал приняты решения, предусматривающие транспортировку газа по территории полуострова исключительно с отрицательной температурой. Для этого в качестве основной технологии осушки газа на установках его подготовки к дальнему транспорту принятая низкотемпературная сепарация с использованием турбодетандерных агрегатов. Данное решение позволяет круглогодично подавать газ в систему магистральных газопроводов Бованенково – Ухта температурой не выше -2°C . Решение полностью себя оправдало. За более чем десятилетний период эксплуатации Бованенковского НГКМ потери устойчивости основания магистральных трубопроводов, их всплытия, сопровождающегося развитием деформаций, на полуострове не отмечено.

Тепловой режим и деформации производственных и жилых зданий. На застроенных территориях в результате природных изменений и хозяйственной деятельности человека растет аварийность геотехнических систем. Во многом это связано с экономией на стадии инженерных изысканий, устаревшими стандартами, нарушением режима эксплуатации. Деформации нередко столь значительны, что сооружения перестают удовлетворять эксплуатационным требованиям, вплоть до того, что их приходится разбирать. Это случается во всех регионах арктической зоны, но наиболее ярко и резонансно отражается на многоэтажной городской застройке (Воркута, Салехард, Надым, Новый Уренгой, Норильск, Якутск, Магадан, Анадырь). Причиной в большинстве случаев является потеря несущей способности ММГ оснований вследствие оттаивания под тепловым воздействием зданий и сооружений, из-за ошибок проектирования и нарушения правил эксплуатации объектов. Снижение несущей способности мерзлых грунтов и развитие деформаций происходит и при отрицательных температурах, в случаях, если грунты засолены, как, например, в Норильске. При этом недостаточно температурного мониторинга теплового состояния грунтов, для установления физического состояния грунтов требуется проведение геофизических исследований, в частности инженерной сейсморазведки.

С проблемой «исчезновения» мерзлоты под зданиями столкнулись в городах Якутии, где влияние потепления оказалось щедро дополнено техногенезом. Закрытость фундаментов делает почти невозможным проведение контрольных горно-буровых работ под объектами, поэтому на первый план инженерно-геологических обследований выходит применение геофизических работ и заверочное бурение скважин по периметру зданий.

Сейсмические методы обеспечивают однозначную идентификацию мерзлого состояния пород в условиях песчано-глинистого разреза [32]. Применение их эффективно на застроенных территориях под жилыми зданиями и в пределах действующих предприятий при любом литологическом составе дисперсных грунтов. В зависимости от конкретных условий используются преломленные или отраженные, преимущественно поперечные SH-волны.

В работах [32, 33] приведено сопоставление результатов термических и сейсмических исследований, выполненных в Мирном (Республика Саха (Якутия)), где с их помощью определена конфигурация техногенных таликов, формирование которых является причиной деформации и аварийного состояния группы зданий. Сейсмические исследования проведены непосредственно под домами, а термические – в 10 скважинах, расположенных с внешней стороны домов. Отмечается существенная разница (до 4 м) в определении глубины кровли ММГ различными методами. Необходимо подчеркнуть, что сейсмическое профилирование дало непрерывную информацию

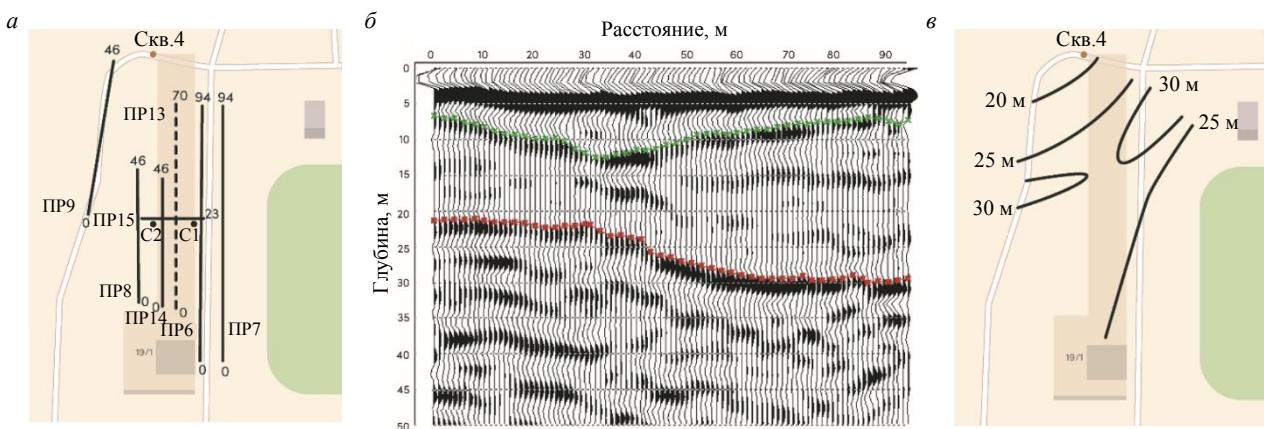


Рис.6. Результаты сейсмических исследований в окрестностях дома № 19 (квартал № 202, Якутск):
 а – схема сети сейсмических наблюдений (пунктир – непродольное профилирование);
 б – глубинный разрез по профилю б (ПР6); в – изолинии кровли ММГ

о мощности талика непосредственно под зданиями, в то время как термометрия для характеристики их основания менее надежна из-за геометрии размещения и термического несовершенства скважин.

Инженерная сейморазведка также позволяет разобраться с природой деформаций сооружений, когда их ошибочно связывают с температурными изменениями в толще грунтов. На рис.6 приведены результаты изучения надмерзлотного талика под домом, построенным на намывных грунтах мощностью 8-13,5 м. Дом подвержен деформациям, которые проявляются в виде трещин в середине здания.

Измерения проводились с помощью отраженных поперечных SH-волн по сети профилей, расположенных как за пределами здания, так и непосредственно под ним, в проветриваемом подполье, а также с помощью непродольного профилирования.

На глубинном разрезе уверенно выделяется граница, соответствующая кровле ММГ. Выше фиксируется граница (зеленая линия), которая, вероятно, связана с подошвой намывных грунтов. Погружение кровли ММГ до 30 м связано с наличием протоки, заполненной намывными грунтами. Конфигурация этой протоки хорошо проявляется на плане изолиний кровли ММГ. Глубина кровли ММГ, определенная с помощью сейморазведки, хорошо согласуется с данными бурения скв.4, которые позволили однозначно идентифицировать и оконтурить кровлю ММГ в плане. Интервал, в котором проявляются деформации здания, практически соответствует интервалу, в котором на профиле б происходит снижение кровли ММГ, и отличается максимальной мощностью намывных грунтов. Это позволяет предположить, что одной из причин деформации здания может являться неравномерность грунтовых условий в пределах талой зоны.

В городах ЯНАО часть зданий получила недопустимые повреждения и была досрочно выведена из эксплуатации и демонтирована, причем в их числе здания, построенные совсем недавно. Причиной недопустимых деформаций является деградация многолетнемерзлых грунтов в основании [34], чаще всего – в результате ошибок при изыскательских и проектных работах. Нередко оказывалось, что злую шутку сыграл положительный опыт строительства прежних лет. Так, в Надыме для первоочередной пятиэтажной застройки был определен участок, характеризующийся распространением с поверхности преимущественно талых песчаных грунтов с маломощными линзами малольдистой мерзлоты. В основном здесь строились пятиэтажные крупнопанельные здания на ленточных и свайных фундаментах (II принцип строительства). Эта практика хорошо себя зарекомендовала, существенных неравномерных деформаций не было. Однако с течением времени этажность строительства постепенно была увеличена, а новые участки застройки сместились в зоны, где геокриологические условия оказались сложнее: талые и малольдистые мерзлые аллювиальные пески на ряде участков подстилались многолетнемерзлыми сильнольдистыми суглинками прибрежно-морского генезиса, не выявленными из-за недостаточной глубинности инженерно-геологических изысканий. Льдистые суглинки в основаниях зданий попали в зону теплового воздействия зданий, построенных с теплыми подвалами, и начались неконтролируемые деформации.



К этому времени и под старыми пятиэтажными домами зона отопления местами достигла льдистых суглинков, где также начались неравномерные деформации. В результате с середины 90-х гг. ХХ в. в Надыме (и Новом Уренгое) были демонтированы 12 жилых домов и ряд промышленных зданий, а для предотвращения дальнейших разрушений применяли инъекцию цементного раствора, компенсирующую фильтрационную консолидацию оттаивающих грунтов.

В Надыме и Салехарде имеется положительный опыт восстановления несущей способности многолетнемерзлых грунтов оснований, деградировавших под тепловым воздействием зданий, с использованием принудительного промораживания (восстановления многолетнемерзлого состояния) грунтов и понижения их температуры посредством применения парожидкостных термостабилизаторов в комбинации с теплоизоляцией поверхности пола в подвалах (рис.7).

В Надыме подобные решения реализованы в 2003-2004 гг. в основаниях двух зданий, подверженных неравномерным осадкам. После восстановления твердомерзлого состояния грунтов оснований деформации зданий прекратились, стабильное состояние несущих конструкций обеспечивается уже на протяжении почти 20 лет.

Вместе с тем, с учетом меняющихся геополитических условий, важно понимание возможностей компаний в сфере производства термостабилизаторов и оказания сопутствующих услуг в России в контексте необходимости импортозамещения и вероятного роста спроса в ближайшей перспективе вследствие повышения влияния климатических изменений на состояние ММГ. В настоящее время можно выделить около десяти ключевых компаний – производителей термостабилизаторов грунта в России. В их числе как узкопрофильные, специализирующиеся исключительно на производстве систем термостабилизации, так и компании с весьма диверсифицированным видом деятельности, связанным с производством широкого спектра строительной номенклатуры. По данным открытых источников, большинство компаний производят около 2500-3500 термостабилизаторов в месяц, а более узкоспециализированные – до 10 тыс. В среднем, по данным ООО НПО «Фундаментстройаркос», удельная стоимость стабилизации квадратного метра замороженного грунта в плане здания составляет от 10000 до 80000 руб./м². Такой разброс цен связан с техническими решениями и расценками в зависимости от категории грунтов и глубины бурения [35].

Большинство организаций – производителей технических решений по термостабилизации ориентированы главным образом на потребителя со стороны предприятий ТЭК, в первую очередь нефтегазодобывающей промышленности, объектов энергетики. Например, в Норильске началась масштабная программа реновации жилищного фонда, которая включает в себя мероприятия по термостабилизации грунтов оснований, объектов транспортно-логистической инфраструктуры (в том числе магистральных газопроводов, аэропортов и др.).

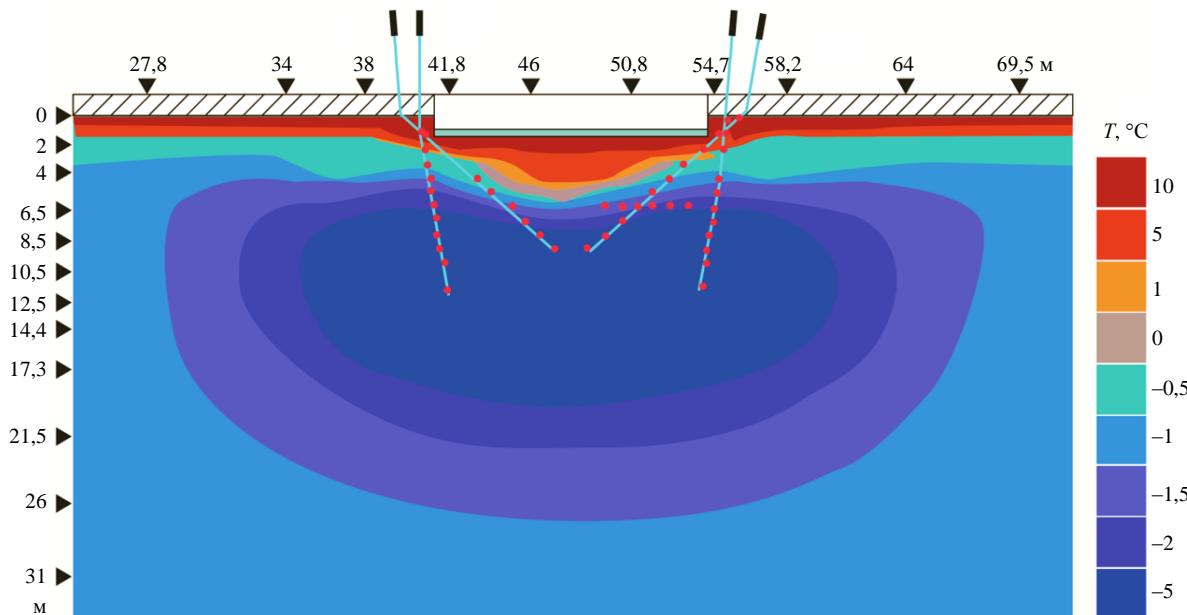


Рис.7. Результаты расчетов промораживания чаши оттаивания в основании жилого дома в Надыме на конец третьего года работы системы термостабилизации



Основные заказчики работ, связанных с термостабилизацией грунтов, локализованы в наиболее экономически развитых регионах криолитозоны, специализирующихся на добыве углеводородного сырья: ЯНАО, Красноярском крае, Иркутской области, Республике Саха (Якутия), Тюменской области, Ненецком автономном округе. Единичные тендера проводят организации из Республики Коми, Забайкальского края, Амурской, Мурманской, Архангельской и Свердловской областей.

Заключение. Основные проблемы и риски хозяйственного освоения Арктики обусловлены сложностью и мозаичностью геокриологического строения и теплового состояния криолитозоны, недостаточной изученностью осваиваемых регионов и неудовлетворительным качеством изысканий, проектирования и строительства, а также отсутствием единой системы фонового и геотехнического мониторинга изменений, происходящих в криолитозоне.

Изменения климата и связанные с этим деградационные процессы многолетнемерзлых горных пород существенно усложнили условия эксплуатации действующих и строительства новых зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения на территории криолитозоны.

Разработка нефтегазоконденсатных месторождений на Севере Западной Сибири и возникающие при этом технологические проблемы, по существу, предопределили практическое развитие разработанных в геокриологии основ геотехнического мониторинга. Ведомственный уровень геотехнического мониторинга решает задачи по обеспечению безаварийной эксплуатации производственных объектов, однако представляется недостаточным для решения стратегических задач снижения рисков хозяйственного освоения новых областей криолитозоны, в далеко не полной мере обеспеченной региональными геокриологическими съемками и мониторинговыми наблюдениями.

В течение последних двух десятилетий отмечается значительный прогресс в области применения и обеспечения нормативной базой современных надежных природосберегающих технических разработок, которые позволяют решать широкий спектр геотехнических задач в криолитозоне при проектировании и строительстве зданий и сооружений, обустройстве систем добывающих скважин и транспортных систем различного типа, обеспечивающих долговременную надежность оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах.

Создание систем термостабилизации в основаниях зданий и сооружений, строящихся и эксплуатируемых на ММГ, позволяет в полной мере использовать один из основных ресурсов криолитозоны – высокую прочность и малую деформируемость мерзлых грунтовых массивов, которые при контролируемом расчетном тепловом режиме обеспечивают проектный уровень их несущей способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданеев О.В. Обеспечение технологического суверенитета отраслей ТЭК Российской Федерации // Записки Горного института. 2022. Т. 258. С. 1061-1078. DOI: [10.31897/PMI.2022.107](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.107)
2. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: [10.31897/PMI.2022.100](https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100)
3. Mingtang Chai, Guoyu Li, Wei Ma et al. Assessment of Freeze–Thaw Hazards and Water Features along the China – Russia Crude Oil Pipeline in Permafrost Regions // Remote Sensing. 2020. Vol. 12. Iss. 21. № 3576. DOI: [10.3390/rs12213576](https://doi.org/10.3390/rs12213576)
4. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // Polar Geography. 2019. Vol. 42. Iss. 4. P. 267-286. DOI: [10.1080/1088937X.2019.1686082](https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1686082)
5. Streletskiy D.A., Suter L.J., 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. № 025003. DOI: [10.1088/1748-9326/aaf5e6](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5e6)
6. Timofeev A.V., Piirainen V.Y., Bazhin V.Y., Titov A.B. Operational Analysis and Medium-Term Forecasting of the Greenhouse Gas Generation Intensity in the Cryolithozone // Atmosphere. 2021. Vol. 12. Iss. 11. № 1466. DOI: [10.3390/atmos12111466](https://doi.org/10.3390/atmos12111466)
7. Post E., Alley R.B., Christensen T.R. et al. The polar regions in a 2 °C warmer world // Science Advances. 2019. Vol. 5. Iss. 12. № eaaw9883. DOI: [10.1126/sciadv.aaw9883](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw9883)
8. Raynolds M.K., Walker D.A., Ambrosius K.J. et al. Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // Global Change Biology. 2014. Vol. 20. Iss. 4. P. 1211-1224. DOI: [10.1111/gcb.12500](https://doi.org/10.1111/gcb.12500)



9. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. et al. Past and Future of Permafrost Monitoring: Stability of Russian Energetic Infrastructure // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 9. № 3190. DOI: [10.3390/en15093190](https://doi.org/10.3390/en15093190)
10. Min Liew, Xiaohang Ji, Ming Xiao et al. Synthesis of physical processes of permafrost degradation and geophysical and geomechanical properties of permafrost // Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 198. № 103522. DOI: [10.1016/j.coldregions.2022.103522](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103522)
11. Ze Zhang, Wei Ma, Zhongqiong Zhang. Scientific concept and application of frozen soil engineering system // Cold Regions Science and Technology. 2018. Vol. 146. P. 127-132. DOI: [10.1016/j.coldregions.2017.11.017](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.017)
12. Мельников В.П., Осинов В.И., Брушков А.В. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 4. С. 3-18. DOI: [10.15372/KZ20220401](https://doi.org/10.15372/KZ20220401)
13. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century // Nature Communications. 2018. Vol. 9. № 5147. DOI: [10.1038/s41467-018-07557-4](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4)
14. Flynn D., Kurz D., Alfaro M. et al. Forecasting Ground Temperatures under a Highway Embankment on Degrading Permafrost // Journal of Cold Regions Engineering. 2016. Vol. 30. Iss. 4. № 04016002. DOI: [10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000106](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000106)
15. Karjalainen O., Aalto J., Luoto M. et al. Circumpolar permafrost maps and geohazard indices for near-future infrastructure risk assessments // Science Data. 2019. Vol. 6. № 190037. DOI: [10.1038/sdata.2019.37](https://doi.org/10.1038/sdata.2019.37)
16. Melvin A.M., Larsen P., Boehlert B. et al. Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation // The Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114. № 2. P. E122-E131. DOI: [10.1073/pnas.1611056113](https://doi.org/10.1073/pnas.1611056113)
17. Buslaev G., Tsvetkov P., Lavrik A. et al. Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change // Resources. 2021. Vol. 10. Iss. 12. № 128. DOI: [10.3390/resources10120128](https://doi.org/10.3390/resources10120128)
18. Lin Chen, Fortier D., McKenzie J.M., Sliger M. Impact of heat advection on the thermal regime of roads built on permafrost // Hydrological Processes. 2019. Vol. 34. Iss. 7. P. 1647-1664. DOI: [10.1002/hyp.13688](https://doi.org/10.1002/hyp.13688)
19. Loktionov E.Y., Sharaborova E.S., Shepitko T.V. A sustainable concept for permafrost thermal stabilization // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 52. Part A. № 102003. DOI: [10.1016/j.seta.2022.102003](https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102003)
20. Shammazov I.A., Batyrov A.M., Sidorkin, D.I., Van Nguyen T. Study of the Effect of Cutting Frozen Soils on the Supports of Above-Ground Trunk Pipelines // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 5. № 3139. DOI: [10.3390/app13053139](https://doi.org/10.3390/app13053139)
21. Васильев Г.Г., Джаябов А.А., Леонович И.А. Анализ причин возникновения деформаций инженерных сооружений объектов газового комплекса в криолитозоне // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 377-385. DOI: [10.31897/PMI.2021.3.6](https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.6)
22. Putikov O., Kholmyanski M., Ivanov G., Senchina N. Application of geoelectrochemical method for exploration of petroleum fields on the Arctic shelf // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125498. DOI: [10.1016/j.geoch.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.geoch.2019.02.001)
23. Syasko V., Shikhov A. Assessing the State of Structural Foundations in Permafrost Regions by Means of Acoustic Testing // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Iss. 5. № 2364. DOI: [10.3390/app12052364](https://doi.org/10.3390/app12052364)
24. Eppelbaum L.V., Kutashov I.M. Well drilling in permafrost regions: dynamics of the thawed zone // Polar Research. 2019. Vol. 38. № 3351. DOI: [10.33265/polar.v38.3351](https://doi.org/10.33265/polar.v38.3351)
25. Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic // Geosciences. 2020. Vol. 10. Iss. 10. № 383. DOI: [10.3390/geosciences10100383](https://doi.org/10.3390/geosciences10100383)
26. Zhdaneev O., Frolov K., Petrakov Y. Predictive Systems for the Well Drilling Operations // Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. Springer, 2021. Vol. 342. P. 347-368. DOI: [10.1007/978-3-030-66081-9_28](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66081-9_28)
27. Громадский А.Н., Арефьев С.В., Волков Н.Г. и др. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномерзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник Ямalo-Ненецкого автономного округа. 2019. № 3 (104). С. 17-21. DOI: [10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003](https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.104.3.003)
28. Мельников И.В., Нерсесов С.В., Осокин А.Б. и др. Геотехнические решения для строительства газовых скважин в особо сложных геокриологических условиях полуострова Ямал // Газовая промышленность. 2019. № 12 (794). С. 64-71.
29. Чикалов С.Г., Пышминцев И.Ю., Засельский Е.М. и др. Опыт применения теплоизолированных лифтовых труб в условиях газовых месторождений Севера Западной Сибири // Газовая промышленность. 2018. № 12 (778). С. 38-42.
30. Георгиади В.Г., Аганов А.А., Поверенный Ю.С. и др. Применение сверхтонкой теплоизоляции при обустройстве месторождений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 1. С. 52-57. DOI: [10.24887/0028-2448-2023-1-52-57](https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-52-57)
31. Sharaborova E.S., Shepitko T.V., Loktionov E.Y. Experimental Proof of a Solar-Powered Heat Pump System for Soil Thermal Stabilization. // Energies. 2022. Vol. 15. Iss. 6. № 2118. DOI: [10.3390/en15062118](https://doi.org/10.3390/en15062118)
32. Судакова М.С., Брушков А.В., Великин С.А. и др. Геофизические методы в геокриологическом мониторинге // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2022. № 6. С. 141-151. DOI: [10.33623/0579-9406-2022-6-141-151](https://doi.org/10.33623/0579-9406-2022-6-141-151)
33. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И. и др. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» // Уголь. 2022. № 12. С. 88-93. DOI: [10.18796/0041-5790-2022-12-88-93](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93)
34. Kamnev Ya.K., Filimonov M.Yu., Shein A.N., Vaganova N.A. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard (Preliminary Results) // Geography. Environment. Sustainability. 2021. Vol. 14. № 4. P. 75-82. DOI: [10.24057/2071-9388-2021-021](https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-021)
35. Шаммазов И.А., Сидоркин Д.И., Батыров А.М. Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 12. С. 200-207. DOI: [10.18799/24131830/2022/12/3832](https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3832)



Авторы: А.В.Брушков, д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой, <https://orcid.org/0000-0001-6437-064x> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), А.Г.Алексеев, канд. техн. наук, руководитель Центра геокриологических и геотехнических исследований, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-6020-0328> (НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, АО «НИЦ Строительство», Москва, Россия; Московский государственный строительный университет, Москва, Россия), С.В.Бадина, канд. экон. наук, научный сотрудник, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8426-9079> (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия; Российский экономический университет имени Г.В.Плеханова, Москва, Россия), Д.С.Дроздов, д-р геол.-минерал. наук, заместитель директора, профессор, <https://orcid.org/0000-0001-8864-3657> (Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия; Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия). В.А.Дубровин, канд. геол.-минерал. наук, главный специалист, <https://orcid.org/0009-0007-0454-6683> (Гидроспецгеология, Москва, Россия), О.В.Жданеев, д-р техн. наук, руководитель, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5287-4397> (Центр компетенций технологического развития ТЭК при Министерстве энергетики РФ, Москва, Россия; Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчева РАН, Москва, Россия), М.Н.Железняк, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, директор, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579> (Институт мерзлотоведения им. П.И.Мельникова СО РАН, Якутск, Россия), В.П.Мельников, д-р геол.-минерал. наук, академик РАН, руководитель научного направления, <https://orcid.org/0000-0002-0863-592x> (Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия), С.Н.Окунев, канд. техн. наук, главный инженер, <https://orcid.org/0009-0003-8465-5812> (ООО НПО «Фундаментстройаркос», Тюмень, Россия), А.Б.Осокин, канд. геол.-минерал. наук, заместитель начальника Инженерно-технического центра, <https://orcid.org/0009-0002-1497-7245> (ООО «Газпром добыча Надым», Надым, Россия), Н.А.Остарков, канд. философских наук, ведущий эксперт-аналитик, <https://orcid.org/0002-4429-4528> (Восточный центр государственного планирования, Москва, Россия), М.Р.Садуртдинов, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7225-6684> (Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия), Д.О.Сергеев, канд. геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-3322-0208> (Институт геоэкологии им. Е.М.Сергеева РАН, Москва, Россия), Р.Ю.Федоров, д-р исторических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3658-746x> (Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия), К.Н.Фролов, руководитель проекта, frolov@rosenergo.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6496-1634> (Центр компетенций технологического развития ТЭК при Министерстве энергетики РФ, Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.