

СНИЖЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТЭК РОССИИ В АРКТИКЕ КАК СЛЕДСТВИЕ ПОВЫШЕНИЯ СРЕДНЕГОДОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

© 2022 г. В. П. Мельников^{a,b,c,*}, В. И. Осипов^{d,**}, А. В. Брушков^{e,c,***}, С. В. Бадина^{e,f,****},
С. А. Великин^{g,*****}, Д. С. Дроздов^{a,h,*****}, В. А. Дубровин^{i,*****}, О. В. Жданев^{j,k,*****},
М. Н. Железняк^{g,*****}, М. Е. Кузнецов^{l,*****}, А. Б. Осокин^{m,*****},
Н. А. Остарков^{l,*****}, М. Р. Садуртдинов^{a,*****},
Д. О. Сергеев^{d,*****}, Е. В. Устинова^{a,n,*****},
Р. Ю. Фёдоров^{a,b,*****}, К. Н. Фролов^{j,*****},
Р. В. Чжан^{g,*****}

^a Институт криосферы Земли СО РАН, Тюмень, Россия

^b Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

^c Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

^d Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия

^e Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^f Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Москва, Россия

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

^h Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

ⁱ Центр государственного мониторинга состояния недр и региональных работ ФГБУ “Гидроспецгеология”, Москва, Россия

^j ФГБУ “Российское энергетическое агентство” Минэнерго России, Москва, Россия

^k Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

^l Министерство Российской Федерации по развитию Дальнего Востока и Арктики, Москва, Россия

^m Инженерно-технический центр ООО “Газпром добыча Надым”, Надым, Россия

МЕЛЬНИКОВ Владимир Павлович – академик РАН, руководитель научного направления ИКЗ СО РАН, заведующий отделом методологии междисциплинарных исследований криосферы ТюмНЦ СО РАН, научный руководитель Международного института криологии и криософии ТюмГУ. ОСИПОВ Виктор Иванович – академик РАН, научный руководитель ИГЭ РАН. БРУШКОВ Анатолий Викторович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой геоэкологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник Международного института криологии и криософии ТюмГУ, БАДИНА Светлана Вадимовна – кандидат географических наук, научный сотрудник географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, старший научный сотрудник РЭУ им. Г.В. Плеханова. ВЕЛИКИН Сергей Александрович – доктор технических наук, начальник Вилуйской научно-исследовательской мерзлотной станции ИМЗ СО РАН. ДРОЗДОВ Дмитрий Степанович – доктор геолого-минералогических наук, заместитель директора по науке ИКЗ СО РАН, исполняющий обязанности заведующего кафедрой инженерной геологии РГУ им. Серго Орджоникидзе (МГРИ). ДУБРОВИН Владимир Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист Центра ГМСН и РР ФГБУ “Гидроспецгеология”. ЖДАНЕЕВ Олег Валерьевич – кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора Российского энергетического агентства Минэнерго России, доцент РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич – академик АН Республики Саха (Якутия), доктор геолого-минералогических наук, директор ИМЗ СО РАН. КУЗНЕЦОВ Михаил Евгеньевич – кандидат экономических наук, директор ФАНУ “Востокгосплан” Минвостокразвития РФ. ОСОКИН Алексей Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель начальника ИТЦ ООО “Газпром добыча Надым”. ОСТАРКОВ Николай Александрович – ведущий специалист Минвостокразвития РФ. САДУРТДИНОВ Марат Ринатович – кандидат технических наук, директор ИКЗ СО РАН. СЕРГЕЕВ Дмитрий Олегович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэкологии ИГЭ РАН. УСТИНОВА Елена Валерьевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент ТИУ, старший научный сотрудник ИКЗ СО РАН. ФЁДОРОВ Роман Юрьевич – доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник ИКЗ СО РАН, ведущий научный сотрудник отдела методологии междисциплинарных исследований криосферы ТюмНЦ СО РАН. ФРОЛОВ Константин Николаевич – директор проекта Центра компетенций технологического развития ТЭК ФГБУ “Российское энергетическое агентство” Минэнерго России. ЧЖАН Рудольф Владимирович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИМЗ СО РАН.

ⁿ *Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия*

**E-mail: melnikov@ikz.ru*

***E-mail: osipov@geoenvironment.ru*

****E-mail: brouchkov@geol.msu.ru*

*****E-mail: bad412@yandex.ru*

******E-mail: frozen@mirny.sakha.ru*

******E-mail: ds_drozdov@mail.ru*

******E-mail: dva946@yandex.ru*

******E-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru*

******E-mail: fe1956@mail.ru*

******E-mail: m.kuznetsov@vostokgosplan.ru*

******E-mail: osokinab@mail.ru*

******E-mail: ostarkov@gmail.com*

******E-mail: mr_sadurtdinov@mail.ru*

******E-mail: sergueevdo@mail.ru*

******E-mail: sciensec@ikz.ru*

******E-mail: r_fedorov@mail.ru*

******E-mail: frolov@rosenergo.gov.ru*

******E-mail: zhang.rv@yandex.ru*

Поступила в редакцию 10.11.2021 г.

После доработки 17.11.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

В статье рассматривается влияние объектов различных отраслей топливно-энергетического комплекса России на криолитозону в Арктике и их устойчивость в связи с изменением климата и состояния верхних горизонтов криолитозоны. Описаны эффективные подходы при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов ТЭК в криолитозоне. Для наиболее значимых подотраслей энергетики (добыча и транспорт нефти и газа, обеспечение электрической энергией) проведена оценка экономического ущерба в результате изменения инженерно-геокриологических условий под воздействием естественного и антропогенного факторов. Показана необходимость внедрения новых методов проектирования и строительства, проведения на предприятиях ТЭК комплексного фонового и геотехнического мониторинга и создания центра анализа получаемых данных.

Ключевые слова: ТЭК, криолитозона, многолетнемёрзлые грунты, экономический ущерб, геотехнический мониторинг.

DOI: 10.31857/S0869587322040053

Современные изменения климата и, как следствие, изменение состояния мёрзлых грунтов на территориях с сезонным промерзанием, а также многолетнемёрзлыми грунтами (ММГ), занимающими 11.2 из 17 млн км², или 65.5% площади страны, определяют необходимость разработки и выполнения мероприятий по адаптации энергетических объектов. Около 85% территории Арктической зоны РФ (примерно 3.5 млн км²) относится к областям сплошного распространения ММГ. Вследствие развития неблагоприятных экзогенных геологических и мерзлотных процессов существует опасность кратного роста аварийных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса (ТЭК), возможной потери несущей способности оснований фундаментов зданий и инженерных сооружений в нефтегазовой отрасли, электроэнергетике, угольной промышленно-

сти: добывающих скважин, дорог, трубопроводов, плотин, ЛЭП и шахт.

В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года уровень ежегодной добычи нефти и газового конденсата запланирован в 490–555 млн т, газа – в 860–1000 млрд м³ [1]. Данные объёмы будут обеспечиваться освоением трудноизвлекаемых запасов континентальной части страны, новых месторождений северной части Западной и Восточной Сибири [2]. Подавляющее большинство перспективных нефтегазовых горизонтов расположено в криолитозоне России. Освоение углеводородных ресурсов влечёт за собой масштабное развитие энергетической и транспортной инфраструктуры.

Возможный ущерб в цикле потепления, длящегося десятки лет, для промышленных и гражданских объектов, расположенных только на тер-

ритории Арктической зоны РФ, может составить около 7 трлн руб. [3]. Оценка ущерба для объектов ТЭК не проводилась, новые планируемые промышленные объекты в области криолитозоны могуткратно увеличить ущерб от потепления.

В настоящее время, из-за отсутствия системных исторических данных и комплексного мониторинга криолитозоны, выполнить прогноз изменения состояния многолетнемёрзлых грунтов применительно к новым инвестиционным проектам ТЭК в криолитозоне России на период свыше 3–4 лет не представляется возможным. Возможность достоверного прогноза на среднесрочную (15–50 лет) и долгосрочную (свыше 50 лет) перспективу ограничена прежде всего точностью климатического прогнозирования и отсутствием обмена данными по фоновому и геотехническому мониторингу между компаниями ТЭК в рамках регионов и на федеральном уровне. Основой для решения данной проблемы должен стать готовящийся Федеральный закон “О промышленных данных”.

ВЛИЯНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТЭК НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

Объекты ТЭК оказывают разнообразное воздействие на природную среду Арктики. На территории Ямало-Ненецкого автономного округа сосредоточено самое крупное в мире стадо оленей, которое, по примерным подсчётам, составляет около 750 тыс. голов. Восемнадцать тысяч проживающих в округе представителей коренных малочисленных народов ведут традиционный кочевой образ жизни: занимаются оленеводством, рыболовством и сбором дикоросов [4]. Одна из наиболее серьёзных проблем влияния ТЭК на жизнь оленеводов – сокращение площади пастбищ. Данная проблема обусловлена следующими факторами. Первый связан с нарушением ягельных покровов и их загрязнением в результате некачественной рекультивации территорий выводящихся из эксплуатации объектов и регулярными экологическими авариями на объектах ТЭК [5]. Второй фактор – препятствия передвижению оленей, которые создают линейные сооружения. Автодороги и трубопроводы перерезают пути миграции диких оленей, а также существенным образом сокращают или корректируют традиционные маршруты кочевий оленеводов [5]. Масштабы сокращения пастбищ в разных районах сильно варьируют в зависимости от техногенной нагрузки предприятий ТЭК, местами достигая 25% [6]. В ходе сокращения пастбищ на многих участках тундры усиливается возникающая в последние десятилетия тенденция к перевыпасу оленей, которая ведёт к деградации растительного покрова, тиксотропии и другим изменениям почв [7]. Освоение арктических нефтегазовых запасов служит

причиной нарушений не только растительности и почвы, но и гидрологических условий на поверхности, а также масштабного теплового и механического воздействия на многолетнемёрзлые грунты. В частности, загрязнение рек отходами ТЭК повлекло за собой значительное сокращение традиционных для жителей ряда арктических регионов рыболовных промыслов. Увеличение площадей протаивания многолетнемёрзлых грунтов и изменение динамики формирования ледовых и снежных покровов способствуют сокращению периодов транспортной доступности небольших удалённых поселений, а также существенно снижают пространственную мобильность охотников и собирателей. Для минимизации перечисленных проблем важна интеграция геоэкологического и геокриологического мониторинга с этнологической экспертизой [8].

РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Вопрос растепления многолетнемёрзлых грунтов особенно актуален на газовых месторождениях России, так как все основные газовые месторождения-гиганты, разрабатываемые ПАО “Газпром” (Медвежье, Уренгойское, Ямбургское, Заполярное, Бованенковское и другие), а также значительная часть объектов транспорта газа расположены в зоне распространения многолетней мерзлоты [9]. К зоне распространения многолетнемёрзлых пород относится и территория новых месторождений в Восточной Сибири (Чаяндинское и Ковыктинское), к освоению которых приступила компания.

В 70-х годах прошлого столетия проектные институты не располагали достаточным опытом проектирования оснований и фундаментов на многолетнемёрзлых грунтах в условиях Арктики. Отсутствовали методики прогноза изменения геокриологических условий территории при промышленной застройке. Не было опыта масштабного применения и промышленного производства охлаждающих устройств.

Основным техническим решением по строительству фундаментов объектов нефтегазового комплекса на ММГ служило использование металлических труб в качестве свай с погружением их в талые и многолетнемёрзлые грунты буропускным и бурозабивным способом. Для сохранения многолетнемёрзлого состояния грунтов оснований и обеспечения их проектного теплового режима применялся, по сути, единственный способ – вентилируемые подполья в основаниях зданий. На участках застройки вне контуров зданий, в пределах которых располагались отдельно стоящие сооружения, оборудование, эстакады технологических трубопроводов, тепловой режим ММГ проектами был продекларирован, од-

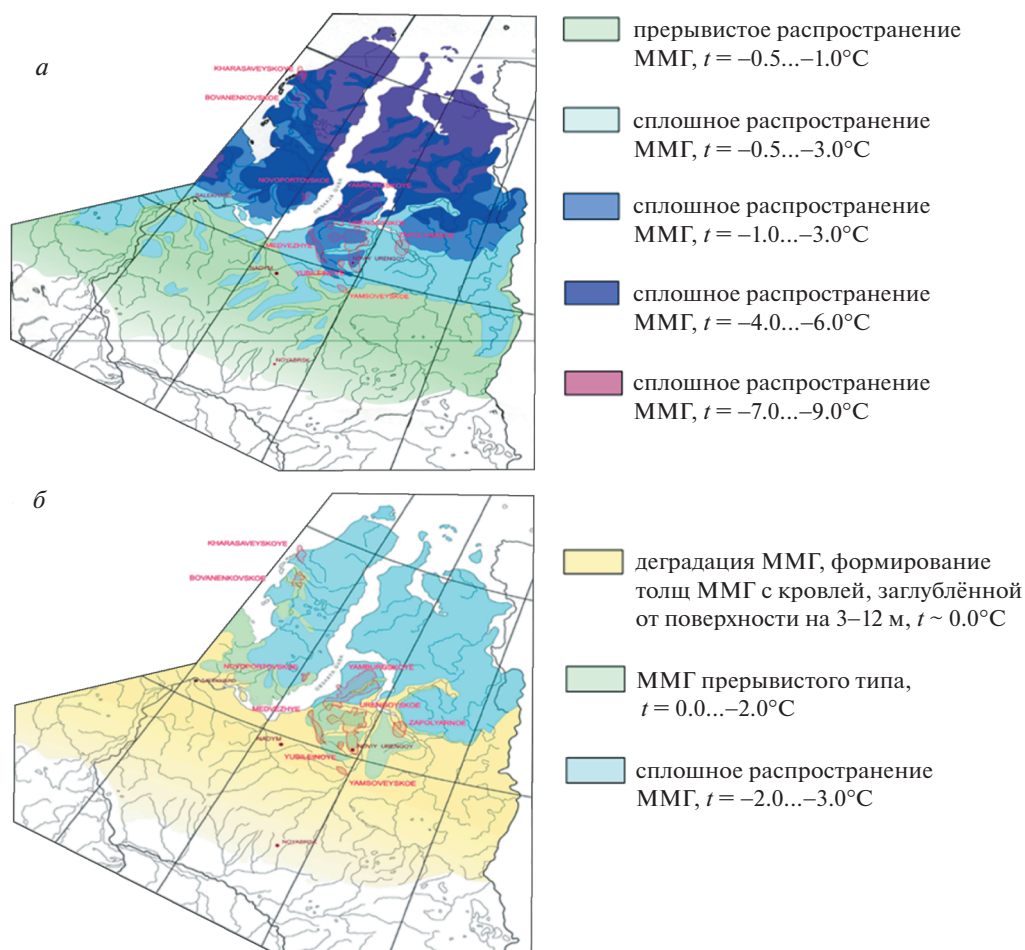


Рис. 1. Динамика геокриологических условий севера Западной Сибири при наиболее высоком прогнозируемом значении тренда потепления: состояние к началу 1990-х годов (а) и к 2050 г. (б)

Источник: по данным Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН за 2012 г.

нако не обеспечен специальными техническими средствами. Не выполнялся прогноз изменений мерзлотно-геологических условий, обусловленных прямым и опосредованным тепловым воздействием зданий и сооружений, изменением условий снегонакопления и увлажнения, состава, влажности грунтов сезонно-талого (или сезонно-мёрзлого) слоя и его мощности.

В итоге при обустройстве месторождений было допущено много строительных ошибок, которые привели к последующему развитию деформаций зданий, сооружений и газопроводов, возникновению аварийных ситуаций, преждевременному физическому износу объектов и необходимости проведения значительного объёма ремонтных работ, досрочному выводу объектов из эксплуатации. Многолетнемёрзлые грунты, служащие основаниями зданий и сооружений, деградировали: из твердомёрзлого состояния перешли в пластичномёрзлое, либо оттаяли, что привело к частичной или полной потере их несущей способности.

По результатам обобщения и систематизации опыта крупного промышленного строительства на севере Западной Сибири, внедрения современных технологий проектирования и строительства на многолетнемёрзлых грунтах «Газпром» сформировал техническую политику в области геотехники в криолитозоне, прежде всего за счёт опыта дочернего общества «Газпром добыча Надым».

Фактические наблюдения свидетельствуют о повышении среднегодовых температур многолетнемёрзлых грунтов. Поэтому при проектировании новых объектов на полуострове Ямал, начиная с проекта обустройства сеноманских залежей Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, «Газпром» предусматривает резервирование их надёжности с поправкой на прогнозируемую величину потепления, которая в свою очередь основывается на результатах научно-исследовательских работ (рис. 1).

Резервирование надёжности оснований и фундаментов достигается за счёт конструктива

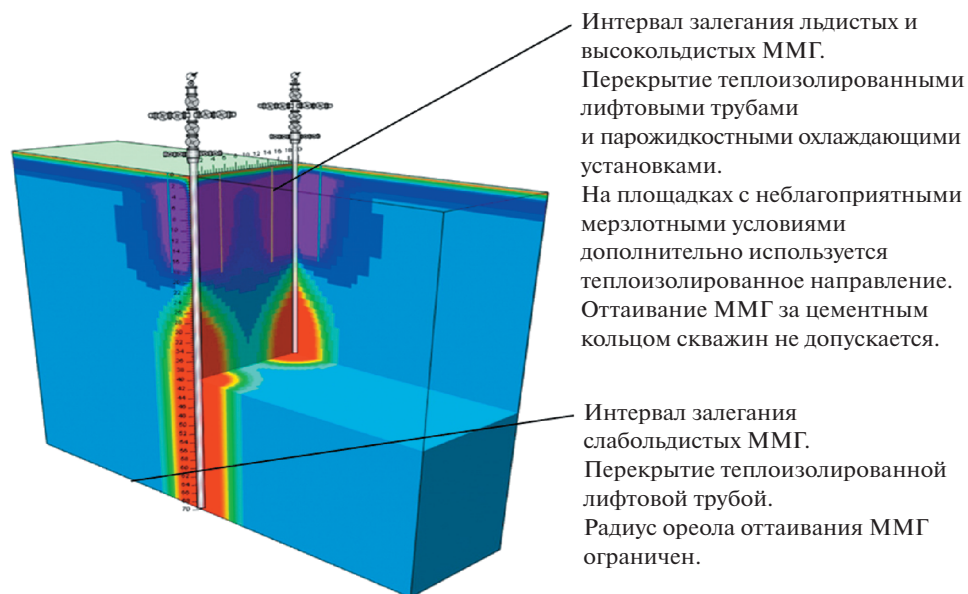


Рис 2. Технические решения по термостабилизации многолетнемерзлых грунтов в приустьевых зонах добывающих скважин

Источник: по материалам ООО «Газпром проектирование».

фундаментов (речь идёт о глубине погружения свай, способе их погружения и диаметрах), но главным образом — путём использования систем термостабилизации, в том числе сезоннодействующих охлаждающих установок (СОУ). При проектировании объектов расчётный температурный режим многолетнемерзлых грунтов оснований обосновывается посредством моделирования с использованием специализированных программных продуктов, реализующих численные методы расчёта, с учётом прогнозного тренда температуры воздуха. Фактически в основаниях строящихся объектов создаются массивы многолетнемерзлых грунтов с программируемым тепловым состоянием и механическими свойствами.

Отдельно следует отметить новые подходы к обеспечению устойчивости добывающих скважин и площадок их размещения в условиях сплошного распространения высокольдистых ММГ на полуострове Ямал. Известно, что эксплуатация добывающих скважин в условиях вечной мерзлоты сопровождается формированием приустьевых термокарстовых просадок, деформациями трубопроводных обвязок скважин, в отдельных случаях — потерей герметичности резьбовых соединений и искривлениями обсадных колонн, обусловленных оттаиванием и деформациями вмещающих скважины ММГ.

На месторождениях ПАО «Газпром» в Ямало-Ненецком автономном округе верхние горизонты газовых скважин, до глубины около 120–250 м в пределах пойм крупных рек и до 320–340 м в пределах водоразделов (морских террас), состоят из

пород в многолетнемерзлом состоянии. При строительстве скважин на Бованенковском месторождении впервые в практике компании использовано комплексное теплотехническое решение, обеспечивающее сохранение верхних горизонтов ММГ: в конструкции скважин предусмотрены теплоизоляционные лифтовые трубы (ТЛТ) с вакуумной теплоизоляцией, спускаемые на глубину от 50 до 150 м от устья скважин. В приустьевых зонах скважин монтируются парожидкостные трубчатые системы термостабилизации. Размещение кустов газовых скважин на территории месторождений осуществлено с учётом результатов специализированного геокриологического картирования и мерзлотно-параметрического бурения (рис. 2). Опыт первых лет эксплуатации Бованенковского месторождения продемонстрировал, что реализованные технические решения в полной мере себя оправдали. Кроме того, применение комплексных решений по термостабилизации устьевых зон скважин позволило сблизить их в кусте с традиционных 40 до 20–15 м, благодаря чему существенно (до 30%) снизились затраты на обустройство кустовых площадок за счёт сокращения их размеров, получен значительный экономический эффект.

На Харасавэйском месторождении, которое характеризуется ещё более сложными геокриологическими условиями, чем Бованенковское, для теплоизоляции добывающих скважин наряду с теплоизолированными вакуумными лифтовыми трубами в конструкции применены также допол-

нительные теплоизолированные обсадные колонны с пенополиуретановой теплоизоляцией.

ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ НЕФТИ И ГАЗА

На конец 2016 г. эксплуатационная длина магистральных газопроводов в России составляла 179 тыс. км, магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов – 71 тыс. км [10]. Общая длина магистральных нефтепроводов “Транснефти” – 7049 км, из них 1252 км – в Арктической зоне РФ. При этом на нефтепроводах в Арктике температура грунта измеряется российской нефтепроводной компанией ежемесячно по 5348 термометрическим скважинам.

Транспортные объекты из-за их большой протяжённости отличаются значительным разнообразием вдоль трассы по природным условиям и применяемым техническим решениям [11]. Поэтому стандартные подходы и методы оценки природно-техногенных опасностей применимы только после районирования трассы трубопровода и его сегментирования на участки, сходные по природным условиям и применённым техническим решениям [12].

Влияние трубопровода на многолетнемёрзлые грунты можно разделить в зависимости от вида техногенного воздействия на три типа: механические нарушения поверхности почвы, тепловые воздействия инженерных объектов и нарушения поверхностного стока на участках возведения автодорожных насыпей, оборудования трубопроводной траншеи или земляного вала над ней. Такие воздействия в конечном счёте приводят к нарушению теплообмена через поверхность и изменению теплового режима многолетнемёрзлых грунтов. Вторичные последствия изменений геокриологических условий влекут за собой активизацию инженерно-геологических процессов и порождают новые природные опасности, например, оползни или наводнения [13].

Оттаивание многолетнемёрзлых грунтов и льда в основании инженерных объектов приводит к неравномерным осадкам грунта и деформациям [14]. Развитие неравномерных осадков и, как следствие, изменение планово-высотного положения на разных участках трубы могут привести к нарушению её напряжённо-деформированного состояния и последующим возможным разрывам.

Под тепловыми воздействиями инженерных объектов в полосе землеотвода магистрального трубопровода следует понимать прежде всего отепляющее воздействие трубы и формирование ореола оттаивания в мёрзлых грунтах. Важно учитывать, что нефтепроводы почти всегда разогреты до положительных температур, а газопроводы имеют различный температурный режим, завися-

щий от интенсивности охлаждения газа на компрессорных станциях. Образование ореола оттаивания и последующая осадка грунта влекут за собой изменение положения трубопровода и возникновение аварийных ситуаций. В литературе широко представлены математические постановки задач оттаивания ММГ и даны методы их решения [15].

Проблемы возникают при пересечении трубопроводами переходных зон ландшафта с высокоинтенсивными природными процессами. К таким зонам относятся, в частности, берега рек, озёр и морей [16].

Кроме геотехнических проблем строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов, необходимо уделять внимание также вопросам охраны окружающей среды, поскольку нерегулируемые антропогенные воздействия и последствия изменения геокриологических условий приводят к экологическому ущербу [17].

ПРАКТИКА СООРУЖЕНИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Опыт возведения плотин в криолитозоне первой в мире продемонстрировала в 1776 г. на реках Забайкалья именно Россия [18]. При этом родилась идея использовать в качестве противотрационной преграды в плотинах мёрзлый грунт. Так, в 1780–1792 гг. в Петровске-Забайкальском на р. Мыкырт была возведена первая грунтовая плотина мёрзлого типа высотой 9.5 м. Е.В. Близняк [19] впервые сформулировал принципы строительства грунтовых плотин в криолитозоне. В районах с вечной мерзлотой предпочтительно мёрзлое состояние ядра плотины и основания фундаментов. Надёжность плотин зависит от механических характеристик мёрзлого грунта. Не допускается просачивания воды, иначе с течением времени вода будет способствовать оттаиванию окружающих грунтов, что приведёт к отказу плотины.

В XX в. появилось несколько плотин в криолитозоне Северной Америки, в частности, на р. Литл Чена высотой 31 м (США, Аляска) и на р. Нельсон (Канада) высотой 36.6 м [20]. В настоящее время для замораживания грунтовых плотин широко используются сезоннодействующие охлаждающие установки (СОУ) [21]. Однако замораживающие системы не всегда эффективны. Пример тому – некоторые гидротехнические сооружения в Якутии, Магаданской области и на Северо-Востоке России, для поддержания которых в мёрзлом состоянии требуются большие ежегодные затраты. По талому, а точнее, по смешанному принципу работают плотины, имеющие значительную высоту – Вилюйская, Колымская, Курейская и Хантайская ГЭС. В целом они оказа-

лись более надёжными, что обусловлено в основном высокой степенью проектно-изыскательских работ, качеством сооружения и мониторингом на всех стадиях строительства и эксплуатации. Однако и эти плотины испытывают проблемы, связанные с формированием криогенного режима в теле и основании сооружения [22].

Опыт возведения гидроэнергетических объектов в криолитозоне позволил выявить особенности их строительства. Наиболее благоприятным периодом сооружения гидроузлов, как ни парадоксально, оказалась зима. Так, при строительстве Вилюйской ГЭС-1 и ГЭС-2 был предложен “сухой” метод, заключающийся в том, что запасы мелкодисперсных грунтов для зимней укладки создаются летом по мере их оттаивания с укладкой в бурты зимнего хранения. Этот метод получил дальнейшее развитие на Усть-Хантайской, Курейской, Колымской и Усть-Среднеканской ГЭС [23].

В России отработано несколько приёмов строительства плотин: методом послойного намораживания грунта (плотина 7 м на р. Наледной в Норильске) [24]; сухим методом, применявшимся на Усть-Хантайской, Курейской, Колымской и Усть-Среднеканской ГЭС [23]; методом холодного штампа на гидроузле в Якутии (р. Марха) для промораживания талика. В результате применения последнего за один зимний период был стабилизирован талик, а его размеры уменьшились по глубине с 6 до 3 м, по ширине — с 20 до 10 м, температура пород понизилась с -1 до -4°C , а выход фильтрационного потока в нижний бьеф был остановлен [24].

В условиях потепления наибольшие проблемы испытывают плотины среднего и низкого напоров. В этой связи интересен опыт эксплуатации плотин на р. Мянунджа в Магаданской области и на р. Матта в Якутии. Тепловое состояние плотины на р. Матта изменилось, правое крыло перешло в талое состояние (температура грунтов до глубины 10 м повысилась до $+5^{\circ}\text{C}$), левое крыло остаётся мёрзлым, но температуры повысились с -3 до -2°C , что привело гидроузел к критическому состоянию по устойчивости [22]. В целом, несмотря на положительный опыт строительства и эксплуатации гидроузлов в криолитозоне, вопрос обеспечения их устойчивости стоит остро. Продолжается работа по совершенствованию нормативных документов. Актуализированная редакция СП 39.13330.2012 требует доработки раздела, касающегося гидротехнических сооружений в криолитозоне [20].

Плотины, возводимые в таких районах, нуждаются в геотехническом мониторинге многолетнемёрзлых грунтов. Среди типичных проблем — просачивание воды через плотину, оттаивание вечной мерзлоты вокруг водосброса, изменение

высоты плотины, отказ СОУ, оттаивание и эрозия берегов водохранилища. Увеличение объёма за счёт осадки дна при оттаивании установлено у Усть-Хантайского водохранилища, проектный уровень которого был достигнут лишь спустя 20 лет после заполнения. Однако на Вилюйском водохранилище в силу инженерно-геологического строения ложа и берегов увеличение объёма водохранилища с 1967 по 1982 г. оценивается всего в 0.05 км^3 , или 0.14% [22, 25]. Плотина ГЭС на р. Вилюй построена таким образом, что охватывает долину между мёрзлыми скальными породами со льдом, заполняющим трещины. Когда её возвели, то обнаружили, что часть водного потока движется по трещинам и теряется. Потери наблюдаются и сейчас, они непредсказуемы, что представляет потенциальную угрозу для объекта. Конвекция может переносить тепло с водой в плотину, что ведёт к её оттаиванию и разрушению, как это наблюдалось на некоторых объектах в России [26] и Канаде.

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Якутская ТЭЦ была введена в эксплуатацию 7 ноября 1937 г. Здание ТЭЦ относится к первым крупным промышленным объектам страны и мира, построенным по принципу использования грунтов в качестве основания в мёрзлом состоянии. На территории организован геокриологический мониторинг и пробурено 54 скважины. Наблюдения показали, что характер изменений средней годовой температуры грунтов основания совпадает с межгодовой изменчивостью температуры воздуха, исключением стали участки активизации теплового техногенного воздействия. В течение 80-летней эксплуатации возникали проблемы обеспечения устойчивости сооружений из-за частичного оттаивания многолетнемёрзлых грунтов, обусловленные главным образом утечками нагретых производственных вод. Так, в 1986 г. общий объём налёдного льда, образовавшегося под главным корпусом ЯТЭЦ, составлял около 600 м^3 [27]. В 1967 г. для промораживания грунтов около стены главного корпуса были установлены многотрубные сезоннодействующие охлаждающие установки системы С.И. Гапеева.

В 2009–2010 гг. происходило растепление грунтов, но в 2011 г. началось восстановление температурного режима грунтов в интервале 1.7 – 2.6°C (рис. 3, б). Здание эксплуатируется до сих пор, столбчатые фундаменты глубиной 4.5 м находятся в удовлетворительном состоянии.

Однако есть ряд негативных примеров, касающихся электростанций. Здание дизельной котельной на объекте “Горизонт” вблизи п. Амдерма испытало осадки до 1 м из-за деформаций свай в основании, сложенном засоленными суглинка-

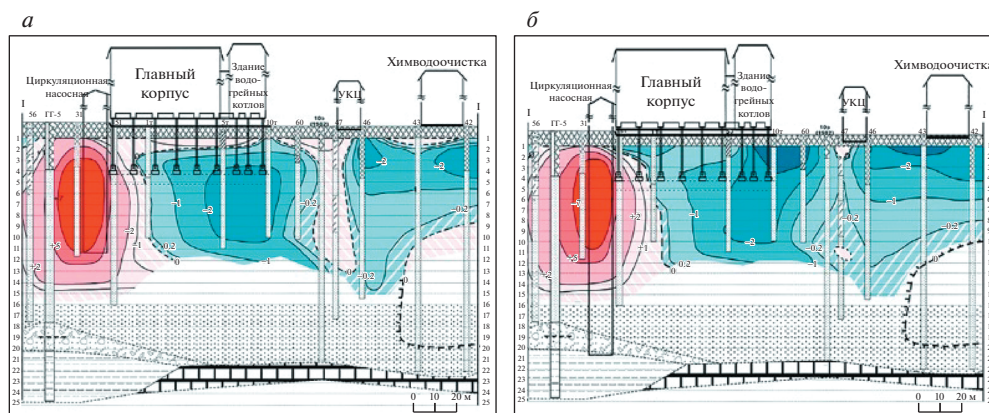


Рис. 3. Средние годовые температуры грунтов основания Якутской ТЭЦ за 2013 г. (а) и 2017 г. (б) со схемой расположения наблюдательных скважин [27]

ми, ввиду небольшого (до 1°C) повышения его температур. Здание котельной по ул. Ленина в п. Амдерма испытало осадки, превышающие 1.5 м. Из 19 небольших тепловых и электрических станций в этом посёлке только две имеют незначительные деформации, а десять находятся в аварийном состоянии. Одна из крупнейших техногенных катастроф — разрушение бетонного основания резервуара с дизельным топливом для электростанции — произошла 29 мая 2020 г. в 12 км от центрального района города Норильска по причине осадки многолетнемерзлых грунтов. Росприроднадзор оценил сумму экологического ущерба от разлива 21 тыс. т топлива на ТЭЦ-3 ПАО «ГМК «Норильский никель» почти в 148 млрд руб.

СТРОИТЕЛЬСТВО ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Когда в 1960-х годах началось интенсивное освоение Сибири, пришлось поставить пять трансмиссионных сетей по всей стране. Восточные, центральные и северные линии должны пересечь зоны с вечной мерзлотой. Северная энергосистема пересекает территории протяжённостью более 86 тыс. км.

Основные проблемы для строительства линии электропередачи в зоне ММГ — морозное пучение, осадка при оттаивании [28], наледеобразование, изменение растительного покрова, опустынивание и деградация вечномёрзлых грунтов [29]. Морозное пучение — самая большая проблема в России и Северной Америке. На Аляске были случаи поднятия 10-метровых свай на 1–2 м за счёт морозного пучения, что привело к большим затратам на ремонт [30]. В России, к северу от Тюмени, обнаружено пучение с градиентом роста до 20 см/год. После 20 лет эксплуатации максимальное отклонение электрических столбов может со-

ставлять 2.5–2.7 м [31]. В северо-восточном Китае ряд столбов на линиях электропередачи рухнули из-за морозного пучения.

В Соединённых Штатах и Канаде для низковольтных линий электропередачи используются фундаменты с небольшой глубиной заложения. Например, трасса магистральных электросетей Онтарио с одноконтурной линией 115 кВ оборудована вертикальными деревянными сваями со стальными консолями и средним пролётом 150 м. Сваи размещаются в пробуренных отверстиях глубиной 2.4–2.7 м, которые заполняются грунтом обратной засыпки. Во влажных зонах они могут быть помещены в рифлёные железные круглые кессоны, заполненные фрагментами породы.

В России для фундаментов линий электропередачи 6–10 кВ используются стальные трубы или шнековые сваи из нержавеющей стали, установленные на глубине 5–9 м. Для линий электропередачи 35–110 кВ и 220 кВ диаметр свай увеличен до 630 мм или 720 мм с глубиной установки 10–30 м, которая зависит от напряжения, типа вечной мерзлоты, расположения линии и сил морозного пучения [32].

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАСТЕПЛЕНИЯ МЕРЗЛОТЫ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Одна из задач исследования — оценка ущерба для основных фондов энергетики на мезоуровне, то есть получение численных результатов для территории криолитозоны Арктической зоны Российской Федерации. Поскольку эта работа пионерная для России, первичная мелкомасштабная оценка необходима с перспективой дальнейшего уточнения и расширения полученных результатов. Мы предлагаем оценить величины ущерба от изменения инженерно-геокриологических условий для зданий и сооружений ключевой, наибо-

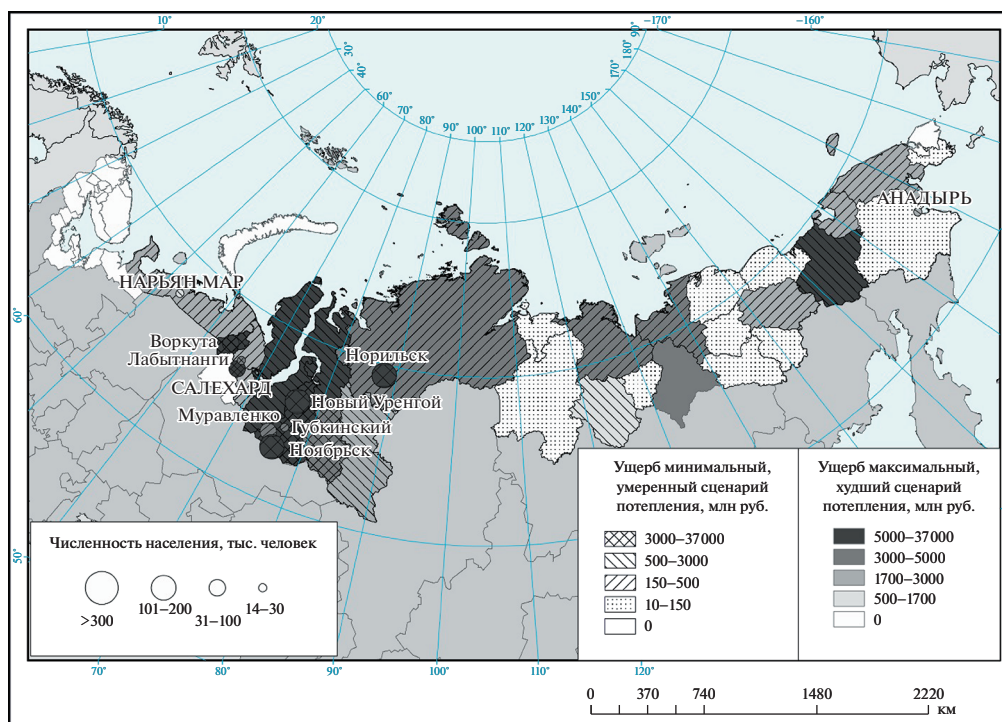


Рис. 4. Распределение возможного ущерба объектам ТЭК по муниципалитетам Арктической зоны РФ

лее социально значимой, особенно в арктических условиях, подотрасли энергетики “Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха”. Она включает деятельность по снабжению электрической и тепловой энергией, газом, паром и горячей водой с использованием постоянной инфраструктуры (сетей) трубопроводов и линий электропередачи. Ключевыми зданиями и сооружениями в данном случае становятся электростанции всех типов, линии электропередачи, предприятия по производству газообразного топлива, газопроводы (без учёта магистральных), котельные и тепловые сети.

Чтобы оценить стоимость зданий и сооружений энергетики на уровне муниципальных образований, применена методика, разработанная и апробированная авторами в предыдущих работах [33, 34]. Она основана на принципе структурной однородности, выявленной для определённых групп социально-экономических показателей, в целях дооценки неизвестных параметров на муниципальном уровне. Вкратце алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Принимается допущение, что показатель стоимости основных фондов по виду экономической деятельности “Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха” в каждом муниципальном образовании пропорционален объёму валового производства в этой отрасли (в соответствующих пропорциях

распределяется региональное значение стоимости основных фондов за 2019 г.).

2. Выделение из общей стоимости основных фондов зданий и сооружений как наиболее восприимчивой к деградации многолетнемёрзлых грунтов составляющей (через рассчитанные среднеотраслевые понижающие коэффициенты). Понижающий коэффициент для отрасли “Производство и распределение электроэнергии, газа и воды”, согласно нашим расчётам, составляет 0.63 (данные 2019 г.).

Согласно проведённым расчётам, общая стоимость зданий и сооружений по виду экономической деятельности “Производство и распределение электроэнергии, газа и воды” в Арктической зоне РФ составляет около 368 млрд руб. Основываясь на ранее опубликованной нами оценке [3] и используя тот же метод, к 2050 г. общий ущерб для этой отрасли, в случае продолжения потепления и снижения несущей способности оснований, может составить от 128 до 244 млрд руб. Распределение возможного ущерба по муниципалитетам Арктической зоны представлено на рисунке 4.

МОНИТОРИНГ МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ГРУНТОВ В ТЭК

За последние 20 лет отмечается тенденция к повышению температуры многолетнемёрзлых грунтов. В Российской Федерации температура

верхних горизонтов за последние 30 лет выросла в среднем на 2°C. Система автоматизированного геотехнического мониторинга ММГ на каждом объекте ТЭК в ближайшей перспективе (5–10 лет) станет безальтернативной.

Для получения практических производственных результатов следует объединить системы мониторинга отдельных предприятий ТЭК в одну программно-аналитическую систему с возможностью прогнозирования изменений ММГ в периоде от одной недели до нескольких лет в границах отдельных субъектов РФ и в целом в криолитозоне страны. Система мониторинга ТЭК должна послужить основной для планируемой принципиальной системы мониторинга многолетнемёрзлых грунтов в масштабах Российской Федерации.

Практически доказано, что использование только относительно доступных данных среднегодовой температуры воздуха не позволит предсказать изменение вечной мерзлоты. Требуется комплекс методов: дистанционное зондирование земли (ДЗЗ), геофизические методы, система геотехнического контроля, включая наблюдательные скважины, наземные исследования. Методы ДЗЗ, в том числе аэрофотосъёмки и космосъёмки с развитием спутниковой группировки, позволяют оценивать температуру поверхности, распространение и мощность снежного покрова, поверхностные воды, структуру растительного покрова, последствия хозяйственной деятельности, изменения в рельефе, указывающие на растепление многолетнемёрзлых грунтов – например, появление новых термокарстовых озёр. Регулярно получаемые данные от ДЗЗ позволят оценить изменчивость ММГ в масштабе субъектов РФ с учётом краткосрочных и долгосрочных климатических колебаний. Использование геофизических методов для получения данных о распространении и мощности многолетнемёрзлых пород, содержании льда и мощности активного слоя особенно актуально в России с широко развитой отраслью сервисных геофизических услуг, прежде всего для нефтегазовой отрасли. Геофизические методы, в первую очередь электроразведка и сейсморазведка (скважинная и наземная), позволяют получать детальную информацию о геокриологическом строении разреза в широком масштабе, физико-механических свойствах, льдистости, влажности активного слоя и ММГ. Как и в нефтегазовой отрасли, геофизические данные должны подтверждаться оборудованием параметрических скважин с проведением в них регулярных наблюдений.

Для промышленных и гражданских зданий и сооружений требуется разработка систем контроля и расчёта напряжённо-деформированного состояния. На всех объектах ТЭК Арктической

зоны для предотвращения экологических катастроф необходимо реализовать систему геотехнического контроля с целью обеспечения механической безопасности зданий и сооружений в той части, которая определяется стабильностью оснований и фундаментов. Система геотехнического контроля рассматривается как составная часть производственного эксплуатационного контроля зданий и сооружений и системы промышленной безопасности. Система геотехнического контроля подразумевает создание специализированных подразделений, служб геотехнического мониторинга – центров ответственности за данное направление работы.

Геотехнический контроль на всех стадиях существования объектов, начиная с их проектирования и выполнения инженерных изысканий, включая стадию строительства и эксплуатации, решает следующий комплекс задач:

- непрерывный инструментальный контроль динамики геокриологических условий в основаниях инженерных объектов и пространственного положения несущих конструкций, оборудования и трубопроводов и их соответствие проектным и нормативным требованиям;
- мониторинг динамики опасных экзогенных мерзлотно-геологических процессов в зоне потенциального воздействия на инженерные сооружения;
- комплексный геотехнический прогноз динамики геокриологических условий и устойчивости оснований и фундаментов, в том числе с использованием численных методов теплотехнического и термомеханического моделирования;
- контроль напряжённо-деформированного состояния конструкций зданий, сооружений, оборудования и трубопроводов с использованием инструментальных и расчётных методов;
- контроль процесса проектирования оснований и фундаментов объектов, включая объёмы и качество инженерных изысканий, выбор площадок строительства, принятие принципиальных строительных решений;
- разработка и реализация технических мероприятий по предотвращению развития недопустимых деформаций зданий и сооружений, стабилизации оснований и фундаментов;
- совершенствование нормативной и методической базы в области проектирования и строительства на многолетнемёрзлых грунтах.

* * *

Для продолжения экономически оправданного промышленного освоения территорий криолитозоны, в том числе в Арктической зоне Российской Федерации, участники топливно-энергетического комплекса страны в ближайшие

три–пять лет должны решить несколько приоритетных задач. Прежде всего необходимо провести анализ возможного ущерба в результате деградации ММГ на объектах нефтегазовой, электроэнергетической и угольной отрасли в период до 2050 г. В этой работе необходимо учесть капитальные и операционные затраты компаний ТЭК.

Сегодня фоновый мониторинг природной среды в РФ, осуществляемый учреждениями Минприроды России, Российской академии наук и Минобрнауки России, проводится в недостаточном объёме. Геотехнический мониторинг, частично включающий температурные измерения, ведётся предприятиями ТЭК, а также региональными организациями по различным методикам и в неполном объёме, нередко без учёта природных тенденций и изучения поверхностных условий, соответствующего анализа и прогнозов, а также без системы обмена данными.

Важной частью адаптации к климатическим изменениям должна стать система государственного геокриологического мониторинга состояния криолитозоны, включающего как наблюдения, так и их анализ, разработку прогнозов и технических решений по инженерной защите. В качестве первого шага возможна реализация пилотных проектов в виде региональных систем мониторинга многолетнемёрзлых грунтов на объектах ТЭК на базе отдельных субъектов Российской Федерации, где ММГ занимает значительную часть площади и где проблемы изменения климата, состояния мерзлоты и обеспечения устойчивости зданий и инженерных сооружений наиболее актуальны. Пилотными регионами могут выступить Ямало-Ненецкий автономный округ, Ненецкий автономный округ, Красноярский край, Республика Саха (Якутия) и другие регионы.

Параллельно необходимо вести системную работу по импортозамещению оборудования для мониторинга и стабилизации многолетнемёрзлых грунтов, созданию отраслевых технических заданий для отечественной электронной промышленности на термодатчики, разьёмы, микроконтроллеры, индикаторы, корпуса приборов, аккумуляторы, цифровую обрабатывающую аппаратуру. В настоящее время в российских системах мониторинга ММГ из отечественных компонентов используются только кабельная продукция и испытательные термостаты. Для анализа большого массива данных требуется участие систем искусственного интеллекта.

Учитывая прогнозный тренд потепления в Арктике, при проектировании объектов капитального строительства на многолетнемёрзлых грунтах необходимо уделить особое внимание обеспечению резервирования надёжности оснований и фундаментов, разработке перспективных методов стабилизации. Сейчас наиболее опти-

мальные виды стабилизации ММГ – различные сезоннодействующие охлаждающие устройства, составляющие не более 5% от капитальных затрат на строительство зданий и сооружений. Однако требуется разработка и новых методов обеспечения устойчивости оснований и фундаментов.

В области нормативно-правового регулирования требуется разработка новых и актуализация существующих отраслевых стандартов проектирования, строительства и эксплуатации объектов ТЭК в криолитозоне России, включая стандартизацию измерений температуры грунтов, обеспечивающих точность измерений в 0.1°C во всём диапазоне измеряемых температур грунтов при изменении внешних условий от –40 до +50°C.

В России существует единственный действующий закон о ведении хозяйственной деятельности в криолитозоне: “О сохранении вечной мерзлоты в Республике Саха (Якутия)” № 1572-V, принятый 22 мая 2018 г. В 2021 г. для создания правовой основы государственной системы мониторинга многолетнемёрзлых грунтов Минприроды России предложило внести изменения в два федеральных закона: “Об охране окружающей среды” и “О гидрометеорологической службе”. Кроме данных инициатив, назрела необходимость разработки проекта федерального закона “О вечной мерзлоте” на основе действующего в Республике Саха (Якутия) соответствующего закона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жданев О.В., Фролов К.Н., Коньгин А.Е., Гехаев М.Р.* Разведочное бурение на арктическом и дальневосточном шельфе России // Арктика: экология и экономика. 2020. № 3(39) С. 112–125.
2. *Жданев О.В., Фролов К.Н.* О приоритетных направлениях развития буровых технологий в России // Нефтяное хозяйство. 2020. № 5. С. 42–48.
3. *Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др.* Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемёрзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 1. С. 14–31.
4. *Головнев А.В., Абрамов И.В.* Олени и газ: стратегии развития Ямала // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2014. № 4(27). С. 122–131.
5. *Мартынова Е.П.* “Чужие” в Тазовской тундре // Вестник Томского государственного университета. История. 2013. № 4(24). С. 73–77.
6. *Kumpula T., Forbes B.C., Stammler F.* Remote sensing and local knowledge of hydrocarbon exploitation: the case of Bovanenkovo, Yamal, West Siberia // Arctic. 2010. № 63. P. 65–178.
7. *Истомин К.В., Хабек Й.О.* Почвы криолитозоны и традиционное природопользование коренного населения Северо-Востока европейской части России и Западной Сибири: постановка исследовательской проблемы // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2019. № 1(44). С. 108–119.

8. *Адаев В.Н., Мартынова Е.П., Новикова Н.И.* Качество жизни в контексте этнологической экспертизы в Российской Арктике: Тазовский район ЯНАО. СПб.: Нестор-История, 2019.
9. *Stammler F., Wilson E.* Dialogue for Development: an Exploration of Relations Between Oil and Gas Companies, Communities and the State // *Sibirica*. 2006. V. 5. № 2. P. 1–42.
10. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата и статьёй 7 Киотского протокола. М., 2017.
11. *Сергеев Д.О., Перльштейн Г.З., Хименков А.Н. и др.* Аэровизуальные обследования для оценки опасности экзогенных геологических процессов на трассе магистрального нефтепровода // *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов*. М.: МГОФ “Знание”, 2019. С. 295–309.
12. *Lato M., Baumgard A., Foster J., Kim D.* Hazard Identification and Evaluation Using UAV Photogrammetry for Pipeline Routing // *GEOQuebec-2015. Challenges from North to South*, September 20–23, 2015, Quebec City. P. 713.
13. *Walker D.A. et al.* Cumulative Effects of Rapid Land-Cover and Land-Use Changes on the Yamal Peninsula, Russia // *Eurasian Arctic Land Cover and Land Use in a Changing Climate*. 2010. P. 207–236.
14. *Stanilovskaya J., Shmelev D., Green E., Dauboin P.* Overview of trunk pipeline practice in Russian permafrost // *XI International Conference on Permafrost*, 20–24 June 2016, Potsdam. P. 1097–1098.
15. *Oswell J.M.* Pipelines in permafrost: geotechnical issues and lessons // *Canadian Geotechnical Journal*. 2011. № 48. P. 1412–1431.
16. *Алексютина Д.М., Огородов С.А.* Устойчивость берегозащитных сооружений в криолитозоне // *Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск (Россия)*, 28–30 сентября 2020 г. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2020. С. 357–361.
17. *Логунова Е.Н., Сергеев Д.О.* Развитие методики экологического сопровождения строительства и эксплуатации магистральных трубопроводов на территории криолитозоны // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология*. 2014. № 3. С. 277–285.
18. *Кроник Я.А.* Надёжность плотин в районах Крайнего Севера и вечномёрзлых грунтов // *Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения*. М.: Стройиздат, 1990. С. 131–143.
19. *Близняк Е.В.* О проектировании и строительстве плотин в условиях вечной мерзлоты // *Гидротехническое строительство*. 1937. № 9. С. 14–16.
20. *Кроник Я.А.* Анализ безопасности гидротехнических сооружений в криолитозоне // *Сборник докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли “Актуальные проблемы геоэкологии” с участием российских и зарубежных учёных, инженеров и специалистов*. МГУ имени М.В. Ломоносова, 15–16 мая 2018 г. Т. 1. Пленарный доклад. М.: КДУ, Университетская книга, 2018. С. 19–41.
21. *Макаров В.И.* Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск: Наука, 1985.
22. *Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В.* Грунтовые плотины в криолитозоне России. Новосибирск: АИ “Гео”, 2019.
23. *Торопов Л.Н.* Гидроэнергетика в суровых условиях Крайнего Севера // *Гидротехническое строительство*. 2001. № 12. С. 11–13.
24. *Чжан Р.В.* Геоэкологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 9–2. С. 288–296.
25. *Голубчиков С.Н.* Риски вторжения в гидросферу Арктики // *Независимая газета*. 2011. 11 мая. https://www.ng.ru/science/2011-05-11/14_arctic.html (дата обращения 30.10.2021).
26. *Мухетдинов Н.А.* Влияние нелинейной фильтрации воздуха на термический режим каменнонабросных плотин // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 1971. Т. 96. С. 205–217.
27. *Заболотник П.С.* Формирование температурного режима грунтов оснований зданий крупных теплоэнергетических объектов в криолитозоне (на примере Якутской ТЭЦ). Автореферат дис. на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук. Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2018.
28. *Wen Z., Yu Q.H., Wang D.Y. et al.* The risk evaluation of the tower foundation frost jacking along Qinghai-Tibetan transmission line and its countermeasures // *Proceedings of the 15th International Speciality Conference on Cold Regions Engineering*. ASCE2012. Québec City, Canada. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2012. P. 573–582.
29. *Yu Q.H., Liu H.J., Qian J. et al.* Research on frozen engineering of Qinghai-Tibet 500 kV DC Power Transmission Line // *Chinese Journal of Engineering Geophysics*. 2009. № 6. P. 806–812.
30. *Lyazgin A.L., Ostroborodov S.V., Pustovoi G.P. et al.* Leveling of pile foundations supporting electric transmission lines by temperature control of bed soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2004. № 41. P. 23–26.
31. *Lyazgin A.L., Baysasan R.M., Chisnik S.A. et al.* Stabilization of pile foundation subjected to frost heave and in thawing permafrost // *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*. Lisse. Swets and Zeitlinger, 2003. P. 707–711.
32. *Гурьянов И.Е.* Несущая способность свайных фундаментов в вечномёрзлых грунтах и общий метод её натурального определения // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2006. № 1. С. 87–90.
33. *Badina S.V.* Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic // *Polar Science*. 2021. V. 29. P. 100730.
34. *Badina S.V.* Prediction of Socioeconomic Risks in the Cryolithic Zone of the Russian Arctic in the Context of Upcoming Climate Changes // *Studies on Russian Economic Development*. 2020. № 31(4). P. 396–403.