ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 4, с. 29–39

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.139.2

ДЕФОРМАЦИИ ЗДАНИЙ НА ЗАСОЛЕННЫХ МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ В ПОСЕЛКЕ АМДЕРМА ВСЛЕДСТВИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2023 г. Ю. В. Черняк[1,*], С. В. Бадина[2,3,], А. В. Брушков[1,***]**

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

[2]МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

[3]РЭУ им. Г.В. Плеханова, научная лаборатория региональной политики и региональных инвестиционных процессов, Стремянный пер., 36, Москва, 117997 Россия

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

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

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

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.
После доработки 24.04.2023 г.
Принята к публикации 22.05.2023 г.

В настоящее время комплексного геотехнического мониторинга свайных фундаментов жилых и производственных объектов в регионах криолитозоны России не существует, и, соответственно, нет достоверной информации о том, какая их доля ежегодно подвергается деформациям, вызванным изменениями геокриологических условий. В данном исследовании представлены результаты полевых работ по обследованию зданий пос. Амдерма, расположенного в Заполярном районе Ненецкого автономного округа – на северо-востоке Европейской части России, в пределах Арктической зоны Российской Федерации. В статье приводятся основные причины деформаций зданий в поселке. Собраны данные по климатическим и мерзлотным условиям и их динамике, особенностям строительства и текущему состоянию инженерных сооружений в Амдерме. На основании исследований инженерных сооружений дается общая характеристика зданий поселка. Установлено, что на данный момент деформировано 59% от общего количества зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных и 31% зданий из легких конструкций; не деформировано лишь 40% тепловыделяющих объектов. Выделены основные причины деформаций оснований: засоленность грунтов, утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием, термокарст на территории застройки, крип, повышение температуры в результате климатических изменений и ползучесть грунтов основания сооружения. Результаты исследования позволили заполнить информационные “пробелы” в изучении арктического побережья Ненецкого автономного округа в работах, посвященных проблеме деформации зданий и сооружений. Полученные новые результаты могут быть интегрированы с другими аналогичными исследованиями.

Ключевые слова: *многолетняя мерзлота*, *геокриологические риски*, *засоленные мерзлые грунты*, *изменение климата*, *Арктическая зона Российской Федерации*

DOI: 10.31857/S0869780923040021, **EDN:** PPANCF

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования социально-экономических последствий активации геокриологических опасностей, возникающих под влиянием климатических изменений, является важным и актуальным направлением научного поиска. Жизнь и экономическая активность людей в условиях криолитозоны связаны со множеством дополнительных издержек, среди которых особенно стоит выделить необходимость применения специфических способов строительства на многолетнемерзлых грунтах. Изменение оптимального диапазона температур грунтов, изначально заложенного при проектировании тех или иных сооружений (инженерных объектов), неизбежно приводит к катастрофическим последствиям – деформациям и их выводу из эксплуатации соответственно.

К сожалению, на сегодняшний день не существует всеобъемлющего комплексного геотехнического мониторинга свайных фундаментов жилых и производственных объектов в регионах криолитозоны России и, соответственно, нет достоверной информации о том, какая их доля еже-

годно подвергается деформациям, обусловленных именно изменениями геокриологических условий. Наличие базы конкретных эмпирических данных по уже деформированным объектам позволило бы осуществлять верификацию прогнозов геокриологических рисков [16, 17, 20], а также служить основой для их уточнения. Мелкий масштаб вышеперечисленных прогнозов (уровень стран и регионов) не позволяет в полной мере учесть локальные особенности конкретных населенных пунктов, например, фактор засоленности грунта. В связи с этим в данном исследовании представлены результаты полевых работ по обследованию зданий пос. Амдерма.

Поселок Амдерма (69°45′22″с.ш.; 61°40′00″в.д.) расположен на побережье Карского моря, к востоку от пролива Югорский Шар на Югорском полуострове. Административно он включен в состав Заполярного района Ненецкого автономного округа и расположен в границах Арктической зоны Российской Федерации.

Поселок основан в 1933 г. в связи с началом строительства рудника по добыче флюорита. Со второй половины 50-х годов XX в. велось активное строительство зданий, развивался морской порт для доставки грузов в Заполярье, был построен аэропорт. Численность населения поселка превышала 10 тыс. человек[1]. Ввиду сложности проектирования и строительства в суровых климатических условиях (сильные ветры и интенсивный снегоперенос, активные береговые процессы, развитие мерзлых пород с высоким засолением) в поселке была создана Амдерминская научно-исследовательская мерзлотная станция для решения задач изучения мерзлых грунтов и их температурного режима, а также мерзлотных процессов[2].

В настоящее время выгодное транспортно-географическое положение поселка на берегу Карского моря предоставляет перспективы его развития как базы для освоения нефтегазоносных месторождений северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Например, в Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г. Амдерма рассматривается как конечный пункт для железнодорожного транспорта (дорога Воркута-Амдерма) и место строительства современного порта с морским терминалом для приемки угля с месторождений округа и Республики Коми. Перспективы инфраструктурного развития, несомненно, требуют детальной проработки проблемы трансформации мерзлотных условий на данной территории.

Начало исследований засоленных мерзлых грунтов как оснований зданий и сооружений относится к 1958 г. При анализе причин деформации зданий в пос. Амдерма Ю.Я. Велли обратил внимание на то, что даже при температуре −3.0...−4.5°С грунты оснований внешне мерзлые с наличием кристаллов льда легко “мялись” руками, т.е. находились в пластичномерзлом состоянии. При этом было учтено, что на территориях, подвергавшихся трансгрессии моря, не могло не остаться его “следов”. Это легло в основу выдвинутой автором гипотезы, что одной из причин деформации зданий может быть наличие в многолетнемерзлых грунтах легкорастворимых солей. На мерзлотной станции в 1959 г. начали проводить разработку данной гипотезы и методики исследований, экспериментальные работы по изучению физико-механических свойств засоленных мерзлых грунтов и других аспектов взаимодействия этих грунтов с фундаментами [3]. Были отмечены повышенная сжимаемость засоленных мерзлых грунтов под нагрузкой, снижение величин эквивалентного сцепления и сопротивления сдвигу по боковым поверхностям фундамента.

В настоящее время существует ряд исследований, посвященных вопросам формирования засоления мерзлых грунтов и распределения засоленности в плане и по разрезу [1, 3, 14, 21], а также изучению физико-механических свойств таких грунтов и их взаимодействия с фундаментами [1, 13, 15, 19]. Однако сравнительно мало данных об особенностях деформаций инженерных сооружений, вызванных недоучетом засоленности грунта при проектировании и строительстве. В качестве примера таких работ можно привести статью [18], в которой рассматривается влияние фактора засоленности грунта на недопустимую осадку здания в г. Барроу (Аляска).

Таким образом, проведенный анализ литературы показал, что на настоящий момент существует небольшое количество локальных данных о деформации инженерных сооружений на засоленных мерзлых грунтах на Арктическом побережье. Многие аспекты, связанные с особенностями и типами деформаций сооружений, а также с причинами, их вызвавшими, неизвестны.

Цель исследования – выявление основных причин деформации зданий в пос. Амдерма.

Для достижения заявленной цели решались следующие задачи: сбор данных о климатических и мерзлотных условиях и их динамике для исследуемой территории, разработка методики исследования, общая характеристика зданий поселка и

[1] СП “Поселок Амдерма” ЗР НАО // Официальный сайт органов местного самоуправления Заполярного района Ненецкого автономного округа. [Электронный ресурс].URL: https://zrnao.ru/o-zapolyarnom-rajone/municzipalnyie-obrazovaniya/mo-%C2%ABposelok-amderma%C2%BB-nao.html (дата обращения: 10.04.2023).

[2] *Брушков А.В.* Мерзлотные станции – уникальное российское преимущество. [Электронный ресурс]. URL: https://goarctic.ru/nauka-i-kultura/merzlotnye-stantsii-unikalnoe-rossiyskoe-preimushchestvo/ (дата обращения: 10.04.2023).

выделение основных факторов деформаций их оснований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика исследования деформаций зданий на засоленных мерзлых грунтах в Амдерме включала несколько этапов. Вначале был проведен обзор информационных источников современного состояния вопроса, касающегося особенностей строительства и текущего состояния инженерных сооружений на Арктическом побережье. Первоначальная информационная база исследования была сформирована на основе данных научных и научно-технических отчетов, в основном подготовленных специалистами Производственного и научно-исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИС) и хранящихся в архивах Амдерминской мерзлотной станции (АНИМС):

1. Комплексные инженерно-геологические исследования для строительства пристройки к школе в п. Амдерма" / НПО "Стройизыскания". Амдерма, 1989.

2. Выбор трассы для прокладки кабеля трансляции сигналов ОРЛ-КДП / АНИМС. Амдерма, 1988.

3. Заключение по инженерно-геологическому обследованию площадки строительства КБО Амдерминской НГРЭ / ПНИИС. Амдерма, 1987.

4. Заключение по предварительному инженерно-геологическому обследованию территории БПО Синькин Нос АНГРЭ / ПНИИС). Амдерма, 1987.

5. Инженерно-геологическое обследование площадки строительства прачечной поселковой больницы пос. Амдермы / ПНИИС. Амдерма, 1986.

6. Провести исследования и разработать рекомендации по обеспечению устойчивости здания ДЭС/. НПО "Стройизыскания", ПНИИС. Амдерма, 1989.

Анализ перечисленных информационных источников, а также работ [1, 18] позволил рассмотреть основные причины деформаций зданий на изучаемой территории по данным предыдущих изысканий.

Следующий этап заключался в сборе данных по климатическим и мерзлотным условиям и их динамике для исследуемой территории. Климатические и мерзлотные условия приводятся на основе данных отчетов АНИМС. Одной из задач настоящей работы было установление связи между развитием деформаций оснований и изменением климата в регионе. Для этого был проанализирован массив данных среднегодовых температур воздуха за период наблюдения 1980–2020 гг. [2].

В ходе полевых исследований, проведенных в июне 2021 г., на основе визуальных обследований изучались следующие характеристики инженерных сооружений пос. Амдерма:

– принцип строительства,
– тип и материал фундамента,
– особенности тепловыделения,
– наличие и характеристика деформаций,
– использование здания в настоящее время.

Осмотр состояния технических этажей, подполий зданий и расположенных в них коммуникаций выполнялся согласно [9].

Деформации оснований и фундаментов фиксировались в соответствии с [10]. В ходе обследований были получены следующие данные: величина осадок фундаментов; характер, место и величина раскрытия трещин на фундаментных конструкциях и стенах здания; физико-механические свойства основания на время проведения обследования; измерены относительные вертикальные и горизонтальные перемещения, а также крен фундамента.

На основе полученных данных составлена общая характеристика зданий пос. Амдерма и выделены основные причины деформаций их оснований.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Мерзлотные условия района исследования

Характеристика мерзлотных условий пос. Амдерма приведена на основе данных отчетов АНИМС. Климат исследуемого района арктический, морской. Среднегодовая температура воздуха составляет –7°С. Преобладают ветра южных румбов, среднегодовая скорость ветра 7.3 м/с. В зимнее время скорости ветра выше, чем летом. Годовая сумма осадков 450 мм, из них 200 мм выпадает в виде снега в холодное время года.

На открытой, ровной территории снежный покров составляет 0.2–0.5 м, однако ввиду сильного ветрового переноса на застроенной территории в отдельных местах мощность снега достигает 1.5 м и более. Согласно отчету ВСЕГИНГЕО о НИР по теме 445–86д "Изучить свойства мерзлых пород и разработать прогноз развития криогенных процессов Амдерминского района" (1989), на территории летного поля аэропорта Амдерма, расположенного на песчаной косе, сложенной морскими отложениями, наибольшие мощности снежного покрова (до 3 м и более) зафиксированы на защищенных от ветра участках, наименьшие (1.0–2.5 м) – на незащищенных от ветра северных склонах. Такое неравномерное распределение снежного покрова оказывает существенное влияние и на формирование температурного режима многолетнемерзлых пород.

Почвенно-растительный покров в естественных условиях представлен кустарничками, мха-

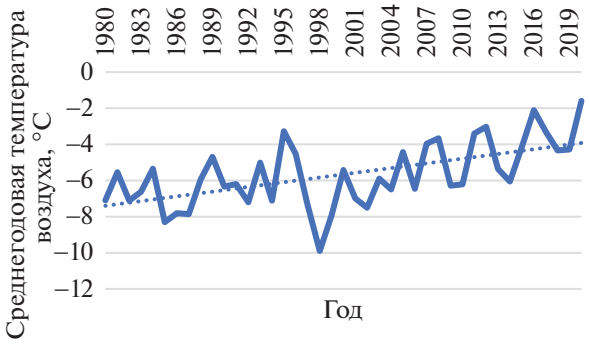

Рис. 1. Среднегодовая температура воздуха в пос. Амдерма [2].

ми, лишайниками, а на застроенных участках, как правило, нарушен.

Преимущественно с поверхности развиты засоленные четвертичные отложения морского происхождения, перекрывающие скальные допалеозойские метаморфизованные породы.

Геоморфологическое строение занимаемой поселком территории представлено ровной, слабонаклоненной в сторону моря поверхностью I и II аккумулятивных морских террас высотой соответственно 8–10 и 15–25 м позднеплейстоценового возраста, сложенных морскими и прибрежно-морскими отложениями преимущественно суглинистого состава, а также пляжем и песчаной косой. Согласно [6], территория поселка относится к приарктической области морских трансгрессий. Породы позднеплейстоценового возраста представлены ледниковыми отложениями, морскими и аллювиально-морскими отложениями морских террас, породы голоценового возраста – морскими осадками пляжей и лайд, аллювиально-морскими отложениями, а также элювием и делювием.

Рис. 2. Термоцирк в 5 км на юго-восток от пос. Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Поселок расположен в районе сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Среднегодовые температуры пород –3.5 – –4.5°С.

Широко распространены засоленные мерзлые грунты. Отметим, что в настоящей работе измерение засоленности и температурного режима грунтов оснований не проводилось, необходимые данные были получены на основе отчетов АНИМС. Засоленность грунтов: песков – 0.05–0.07%, супесей – 0.035–0.10%, суглинков – 0.10–0.90%. Как правило, засоленность грунтов плавно увеличивается с глубиной.

Важно отметить, что за период климатических наблюдений для исследуемой территории характерен рост среднегодовой температуры воздуха. На рис. 1 представлен график среднегодовой температуры воздуха за период наблюдения 1980–2020 гг. За данный период среднегодовая температура повысилась на 3°С. Следовательно, ответной реакцией мерзлых пород является повышение их среднегодовой температуры, что может привести к негативным изменениям свойств грунтов оснований инженерных сооружений при практически их повсеместной засоленности.

Примером динамики мерзлотных условий являются образование и развитие современных термоцирков [7, 11] (рис. 2).

Общая характеристика зданий

По состоянию на 1 октября 2021 г. численность постоянного населения пос. Амдерма составляет 451 человек (по данным Всероссийской переписи населения 2020 г.[3]). Ввиду сильного миграционного оттока населения, характерного для большинства арктических районов в постсоветский период, численность населения поселка сократилась более чем в 12 раз с 1990 г. и более чем в 22 раза с 1950-х годов. Значительная часть жилищного фонда находится в настоящее время в заброшенном состоянии. Действующий жилищный фонд в основном составляют одно-, двух- и трехэтажные деревянные и кирпичные многоквартирные дома, старейшие из которых были построены еще в 30-е гг. XX в., но основная доля была введена в эксплуатацию в 1960–1980-е гг. В 1980-е годы в Амдерме открылась новая страница в истории строительства: началось сооружение зданий со всеми удобствами из алюминиевых конструкций.

[3] Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Том 1. Численность и размещение населения. Таблица 5. Численность населения России [Электронный ресурс]. URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Frosstat.gov.ru%2Fstorage%2Fmediabank%2Ftab-5_VPN-2020.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK (дата обращения: 10.04.2023).

(а) (б)

Рис. 3. Деревянное жилое здание (а) и жилое здание военных строителей (б) в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Согласно данным Фонда содействия реформированию жилищно-коммунального хозяйства, в поселке заселено 13 жилых домов общей площадью порядка 10 тыс. кв. м. В работе [12] их совокупная рыночная стоимость была оценена в 555 млн руб., что составляет лишь порядка 4% от общей рыночной стоимости жилищного фонда Ненецкого автономного округа в ценах 2020 г. При этом все доходы бюджета поселка в 2020 г. с учетом межбюджетных трансфертов составляли порядка 28 млн руб., что говорит о крайне низком потенциале внутренних финансовых возможностей замещения аварийного жилищного фонда вследствие последующих вероятных деформаций. Площадь сформированной территории жилой застройки в границах поселка составляет 3.6 га. Согласно действующему Генплану пос. Амдерма [8], объекты социальной инфраструктуры представлены школой, детским садом, фельдшерско-акушерским пунктом 1997 г. постройки, домом культуры и библиотекой, находящейся в аварийном состоянии, четырьмя объектами розничной торговли, баней на 15 мест, зданием поселковой администрации. Основным источником электрогенерации служит ветродизельная электростанция. Значительную часть территории занимают коммунально-складская застройка и ее развалины. Действующая схема территориального планирования Ненецкого автономного округа предполагает существенное расширение мощностей объектов социальной сферы и, соответственно, новое строительство.

В рамках проведенного полевого исследования в Амдерме было исследовано 220 зданий, из них по материалу строительства: камень – 98 объектов, дерево – 86, алюминий – 29; для 6 объектов материал не определен.

Преобладает свайный тип фундамента, фундаменты в виде плиты встречаются редко. Проектная высота подполья составляет в среднем 1.5 м; толщина ростверка – 0.5 м.

Большинство инженерных сооружений построено по I принципу (сохраняется мерзлое состояние грунтов в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации). Исключение составляют 4 объекта (из них 3 – котельные), построенные по II принципу (перед строительством грунты предварительно оттаивают или используют грунты, оттаивающие в период эксплуатации). Определяющими критериями для выбора II принципа строительства являлись высокое выделение тепла при эксплуатации объекта и близкое к поверхности залегание скальных грунтов.

На основе собранных характеристик было установлено, что на данный момент деформировано 59% от общего количества зданий, из них 80% деревянных, 46% кирпичных и бетонных и 31% зданий из легких конструкций.

В качестве примера неравномерных деформаций и осадки более 1 м среди деревянных сооружений приведем фото одного из жилых зданий (в настоящее время не используется) (рис. 3а). Неравномерные деформации привели к обрушению центральной части деревянного здания (рис. 3б). Неравномерные деформации и осадки более 1 м также привели к частичному или полному разрушению каменных зданий (рис. 4а–в). Примером неравномерных деформаций более 0.5 м среди зданий из легких конструкций является детский сад (рис. 4г).

К тепловыделяющим объектам были отнесены котельные и бани (всего 20 объектов). Из них не деформировано только 8. Таким образом, большая часть тепловыделяющих сооружений испытывает недопустимые и неравномерные деформации, 3 котельные разрушены. В настоящее время используются 2 котельные. По II принципу были построены 3 здания, из них: военная котельная – не деформирована, в настоящее время не используется; котельная военных строителей – недопустимые деформации, осадка более 1.5 м, в настоящее время не используется (рис. 5а); центральная котельная – допустимые деформации, в настоящее время используется. Отмечается, что за последний год на центральной котельной образовались трещины, рядом с котельной на расстоянии

(а)

(б) (в)

(г)

Рис. 4. Школа (а), дом офицеров (б), жилое 5-этажное здание (в) и детский сад “Арктик Строй” в пос. Амдерма (г) (фото Ю.В. Черняк, 2021).

примерно 1 м от здания наблюдается просадка грунта рис. 5б). Тип фундамента центральной котельной – плита, основание – скальные грунты.

В настоящее время в поселке используются 26 зданий (12% от общего числа исследуемых объектов).

Причины деформаций оснований

По данным предшествующих работ можно сделать вывод, что основными причинами деформаций фундаментов в пос. Амдерма могут являться неучет засоленности грунтов основания при проектных расчетах, а также их растепление в процессе эксплуатации.

На основании проведенных в 2021 г. исследований деформаций инженерных сооружений, микрорельефа территории, а также обводненности участков строительства, были выделены основные факторы деформаций оснований:

- засоленность грунтов,
- утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием (рис. 6),
- термокарст на территории застройки (рис. 5б, 7),
- крип,
- повышение температуры в результате климатических изменений или ползучесть грунтов основания.

На рис. 8 представлено сопоставление статистик наблюдаемых недопустимых деформаций с визуальными признаками нарушения условий теплообмена через поверхность в зависимости от принципа строительства. Инженерные сооруже-

(а) (б)

Рис. 5. Котельная военных строителей (а) и центральная котельная (б) в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Рис. 6. Наличие воды (льда) в подполье каменного здания (фото Ю.В. Черняк, 2021).

Рис. 7. Развитие термокарста вблизи здания в поселке Амдерма (фото Ю.В. Черняк, 2021).

ния, для которых фактор деформации визуально не определяется, вероятно, испытывают деформации в результате неучета засоленности грунтов основания при проектировании и строительстве, повышения температуры в результате климатических изменений или ползучести грунтов основания.

Наличие засоленных мерзлых грунтов в основании подтверждается многочисленными архивными данными измерений засоленности грунтов. По-видимому, этот фактор играет ключевую роль, поскольку данные породы распространены практически повсеместно на Арктическом побережье [1, 18]. Поскольку засоленные породы характеризуются повышенными значениями деформационных параметров и низкой несущей способностью, необходимо применение специ-

Рис. 8. Сопоставление статистик наблюдаемых недопустимых деформаций с визуальными признаками нарушения условий теплообмена через поверхность в зависимости от принципа строительства.

альных решений при проектировании и строительстве инженерных сооружений. Однако на практике данные требования не всегда выполняются.

Термокарст вблизи инженерного сооружения связан с наличием подземных льдов и/или сильнольдистых грунтов. Увеличение глубины сезонного оттаивания в результате климатических или техногенных факторов приводит к протаиванию подземных льдов и льдистых грунтов и ведет к изменению рельефа территории строительства.

Утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием вызывают повышение температуры грунтов основания. При изменении температуры грунта, оказывающей влияние на строение и свойства гидратных пленок глинистых частиц, происходит изменение прочности дисперсного глинистого грунта [4, 5].

Принимая во внимание тот факт, что в основании сооружений залегают засоленные мерзлые грунты, то повышение их температуры даже в отрицательном диапазоне может стать причиной перехода мерзлых засоленных пород из твердомерзлого в пластичномерзлое состояние и изменения их физико-механических свойств. Кроме того, повышение среднегодовой температуры способствует понижению кровли залегания многолетнемерзлых пород и может привести к активизации процесса термокарста.

Крип также может являться причиной развития деформаций оснований сооружений, построенных на склоне.

Причиной медленных деформаций оснований может являться ползучесть грунтов, а также постепенное возрастание их среднегодовой температуры. На рис. 1 представлен тренд повышения среднегодовой температуры воздуха для пос. Амдерма, что в свою очередь ведет к повышению среднегодовой температуры грунтов и увеличению глубины сезонного оттаивания, а следовательно, изменению прочностных и деформационных свойств грунтов и активизации на участке застройки геокриологических процессов, связанных с потеплением климата. В настоящем исследовании не проводились измерение температур и их сопоставление с результатами измерений прошлых лет. Однако при долгосрочном периоде наблюдений следует принимать во внимание, что ползучесть грунтов основания может влиять на развитие деформации фундаментов сооружений.

На основе исследования деформаций оснований инженерных сооружений в пос. Амдерма можно сделать вывод, что наибольшее количество разрушений связано с недоучетом засоленности грунтов при проектировании и строительстве. Утечки воды в подполье или перераспределение поверхностного стока рядом со зданием и термокарст также являются частыми причинами деформаций.

Таким образом, из вышесказанного следует, что при строительстве на Арктическом побережье необходимо учитывать засоленность грунтов основания, а также не допускать образования обводненных участков в подпольях инженерных сооружений.

В результате проведенного полевого исследования было установлено, что в настоящий момент в Амдерме не деформировано лишь ~40% соору-

жений, а из 59% деформированных зданий поселка по материалу строительства: 80% – деревянные, 46% – кирпичные и бетонные, и 31% – из легких конструкций. Следовательно, здания из легких конструкций, а также кирпичные и бетонные здания являются наиболее приоритетными объектами для строительства в Арктическом регионе. Причем строительству и дальнейшей эксплуатации тепловыделяющих объектов следует уделять особое внимание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты микрогеографического обследования: дана подробная характеристика мерзлотных условий застроенной территории прибрежного арктического пос. Амдерма. В результате исследования 220 зданий и сооружений установлено, что наиболее часто встречающейся причиной деформаций при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений является недоучет засоленности грунтов основания, изменение температурного режима преимущественно из-за теплового влияния зданий или попадания поверхностных и сточных вод в основание, а также повышение температуры в результате климатических изменений. Следует отметить, что в некоторых случаях причиной деформаций может являться крип. Также одной из причин деформаций является ползучесть грунтов основания.

Проведенное исследование имеет значительную практическую значимость, поскольку его результаты позволили заполнить локальные информационные "пробелы" для арктического побережья Ненецкого автономного округа в круге работ, посвященных проблеме деформации зданий и сооружений. Полученные новые результаты могут быть интегрированы с другими аналогичными исследованиями, и таким образом со временем может быть получена детализированная база данных деформированных объектов и факторов их деформации, которая может служить для уточнения прогнозов экономических последствий геокриологических изменений, в том числе вследствие потепления климата.

Более узкое практическое применение может заключаться в использовании полученных результатов при градостроительном планировании Амдермы, поскольку существующий Генеральный план, предполагающий существенное новое строительство, не в полной мере учитывает специфические особенности локальных мерзлотных условий. Согласно документам стратегического планирования, дальнейшее инфраструктурное развитие Амдермы как опорного пункта Северного морского пути должно повлиять на повышение его миграционной привлекательности и, соответственно, численности населения. В Генеральном плане развития поселка указано, что на всей его территории планируется "*частичный снос ветхих и аварийных жилых домов и строительство на их месте частных жилых домов с приусадебными участками в северной и северо-западной частях населенного пункта, в восточной части населенного пункта предлагается строительство микрорайона индивидуальных и многоквартирных жилых домов <...> предусматривается восстановление части жилых домов после проведения их предварительного обследования текущего состояния, а также строительство новых зданий <...> с учетом сноса всего аварийного и ветхого жилья в течение расчетного срока и сохранения существующего жилого фонда в надлежащем состоянии предусмотрено строительство нового жилья общей площадью 22.6 тыс. кв. м. Таким образом, жилой фонд к концу расчетного срока должен составить не менее 31.5 тыс. кв. м*".

Учет факторов деформации, выявленных в ходе данного исследования, необходим при проектировании будущих зданий и сооружений.

Экономико-географическая часть исследования выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-77-00047 "Прогнозирование экономического ущерба для территории Российской Арктики в контексте изменения геокриологических условий", https://rscf.ru/project/21-77-00047.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брушков А.В.* Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998.
2. *Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В.* Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature
3. *Велли Ю.Я.* Исследования засоленных вечномерзлых грунтов Арктического побережья (обзор) / Ред. С.С. Вялов. М.: Наука, 1990. С. 9–20.
4. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В.* Влияние на прочность глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 69–78.
5. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Дернова Е.О., Осокин А.А.* Методы исследования свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения // Геоэкология. 2022. № 2. С. 80–87.
6. Карта плиоцен-четвертичных образований: R-41 (Амдерма). Государственная геологическая карта Российской Федерации. Третье поколение. Карта плиоцен-четвертичных образований. Южно-Карская серия, масштаб: 1 : 1000000, серия: Южно-Карская, составлена: ОАО МАГЭ, ФГБУ "ВСЕГЕИ", 2008 г., редактор(ы): Лопатин Б.Г.
7. *Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н.* Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. // Арктика и Антарктика. 2021.

№ 4. С. 32–46.
https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225

8. Проект (внесение изменений) генерального плана муниципального образования “поселок Амдерма” Ненецкого автономного округа. Пояснительная записка. Агентство по развитию территорий Geonika. Омск, 2017. 54 с.
https://pandia.ru/text/81/533/67586.php
9. Рекомендации по наблюдению за состоянием грунтов оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах. НИИОСП. М.: Стройиздат, 1982.
https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293793/4293793784.pdf
10. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений. НИИОСП. М.: Стройиздат, 1975.
https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293826/4293826952.pdf
11. *Тумской В.Е., Торговкин Н.В., Романис Т.В.* Термоцирки Якутии // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. № 8. URL:
https://cyberleninka.ru/article/n/termotsirki-yakutii
(дата обращения: 12.04.2023).
12. *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. Iss. 100730.
https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100730
13. *Biggar K., Sego D.* The strength and deformation behaviour of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils // Canadian Geotechnical Journal. 2011. V. 30. P. 319–337.
https://doi.org/10.1139/t93-027
14. *Gilbert G.L., Instanes A., Sinitsyn A.O., Aalberg A.* Characterization of two sites for geotechnical testing in permafrost: Longyearbyen, Svalbard [J] // AIMS Geosciences. 2019. V. 5 (4). P. 868–885.
https://doi.org/10.3934/geosci.2019.4.868
15. *Hivon E.G., Sego D.* Strength of frozen saline soils // Canadian Geotechnical Journal. 1995. V. 32. P. 336–354.
https://doi.org/10.1139/t95-034
16. *Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al.* Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by midcentury // Nature communications. 2018. V. 9 (1). Iss. 5147.
17. *Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al.* Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 // Natural Hazards. 2022. V. 112. P. 231–251.
18. *Miller D.L., Johnson L.A.* Pile settlement in saline permafrost: a case history. // Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec, Que., 1990. P. 371–378.
19. *Sinitsyn A., Løset S.* Strength of frozen saline silt under triaxial compression with high strain rate // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. V. 48.
https://doi.org/10.1007/s11204-011-9148-2
20. *Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I. et al.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. 2019. V. 14 (2). Iss. 025003.
21. *Tavakoli S., Gilbert G., Kydland L.A.O., Frauenfelder R., Forsberg C.S.* Geoelectrical properties of saline permafrost soil in the Adventdalen valley of Svalbard (Norway), constrained with in-situ well data // J. of Applied Geophysics. 2021. V. 195. Iss. 104497.
https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104497

DEFORMATIONS OF BUILDINGS ON FROZEN SALINE SOILS DUE TO CLIMATE CHANGE (THE CASE OF AMDERMA VILLAGE, RUSSIA)

Yu. V. Chernyak[a,#], S. V. Badina[b,c,##], and A. V. Brushkov[a,###]

[a]Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia
[b]Plekhanov Russian University of Economics, Stremyannyi per. 36, Moscow, 117997 Russia
[c]Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia
[#]E-mail: yuchernyak@mail.ru
[##]E-mail: bad412@yandex.ru
[###]E-mail: brouchkov@geol.msu.ru

To date, there is no comprehensive geotechnical monitoring of pile foundations for residential and industrial buildings in Russian regions located in the permafrost zone and, accordingly, there is no reliable information about which part of them annually undergoes deformations caused by changes in geocryological conditions. This study presents the results of fieldwork on inspection of buildings in Amderma village (Zapolyarny district of the Nenets Autonomous Okrug, the North-East of the European part of Russia, part of the Arctic zone of the Russian Federation). The article presents the main reasons for the deformation of buildings in Amderma. Data were collected on climatic and permafrost conditions and their dynamics, construction features and the current state of engineering structures of Amderma. Based on studies of engineering structures, a general description of the buildings is given. It was identified that in 2021, 59% of the total number of buildings were deformed, of which 80% were wooden, 46% brick and concrete, and 31% buildings made of light structures.

Thus, only 40% of the heat-generating facilities in Amderma are not deformed. The main factors of foundation deformations are identified: soil salinity; watering underground or directly near the building; thermokarst in the building area; coastal processes; rise in temperature due to climate change or creep in the base soil. The results of the study made it possible to fill in local information "gaps" for the Arctic coast of the Nenets Autonomous Okrug in the range of works devoted to the problem of buildings and structures deformations. The new results obtained can be integrated with other similar studies.

Keywords: *permafrost*, *geocryological risks*, *frozen saline soils*, *climate change*, *fixed assets*, *Arctic zone of the Russian Federation*

REFERENCES

1. Brouchkov, A.V. Saline frozen rocks of the Arctic coast, their origin and properties. Moscow, MGU Publ., 1998. (in Russian)
2. Bulygina, O.N., Razuvaev, V.N., Trofimenko, L.T., Shvets, N.V. Description of the data array of the average monthly air temperature at the stations of Russia. URL: http://meteo.ru/data/156-temperature (in Russian)
3. Velli, Yu.Ya. Studies of saline permafrost soils of the Arctic coast (review). S.S. Vyalov, Ed., Moscow, Nauka Publ., 1990, pp. 9–20. (in Russian).
4. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., and Sobin, R.V. The influence of variations in hydrate film properties on the strength of clay soils upon thermal impacts. *Geoekologiya,* 2021, no. 1, pp. 69–78. (in Russian)
5. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Dernova, E.O., and Osokin, A.A. Methods of studying the properties of frozen soils and prediction of their changes. *Geoekologiya,* 2022, no. 2, pp. 80–87. (in Russian)
6. Map of Pliocene-Quaternary formations: R-41 (Amderma). State geological map of the Russian Federation. Third generation. Map of the Pliocene-Quaternary formations. Yuzhno-Kara series, scale: 1 : 1000000, series: Yuzhno-Karskaya. Lopatin, B.G., Ed., MAGE, FGBU "VSEGEI" Publ., 2008
7. Maslakov, A.A., Kuzyakin, L.P., Komova, N.N. Dynamics of the development of a thermocircus containing a bed of massive ice near the village of Lavrentiya (Chukotka Autonomous Okrug) for 2018-2021. *Arktika i Antarktika,* 2021, no. 4, pp. 32–46. (in Russian)
8. Draft (amendment) of the master plan of the municipality "Amderma village" of the Nenets Autonomous Okrug. Explanatory note. Omsk, Geonika Territory Development Agency. 2017. (in Russian)
9. Recommendations for monitoring the state of soils of bases and foundations of buildings and structures on permafrost soils. NIIOSP. Moscow, Stroyizdat, 1982. (in Russian)
10. Guidance on observations of deformations of foundations of buildings and structures. NIIOSP. Moscow, Stroyizdat, 1975. (in Russian).
11. Tumskoi, V.E., Torgovkin, N.V., Romanis, T.V. Thermocircuses of Yakutia. *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i Severo-Zapada Rossii*. 2021, no. 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/termotsirki-yakutii (date of access: 04/12/2023) (in Russian)
12. Badina, S.V. Estimation of the value of buildings and structures in the context of permafrost degradation: The case of the Russian Arctic. *Polar Science*, 2021, vol. 29, iss. 100730. https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100730
13. Biggar, K., Sego, D. The strength and deformation behavior of model adfreeze and grouted piles in saline frozen soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, vol. 30, pp. 319–337. https://doi.org/10.1139/t93-027
14. Gilbert, G.L., Instanes, A., Sinitsyn, A.O., Aalberg, A. Characterization of two sites for geotechnical testing in permafrost: Longyearbyen, Svalbard [J]. *AIMS Geosciences*, 2019, vol. 5 (4), pp. 868–885. https://doi.org/10.3934/geosci.2019.4.868
15. Hivon, E.G., Sego, D. Strength of frozen saline soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, vol. 32, pp. 336–354. https://doi.org/10.1139/t95-034
16. Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by midcentury. *Nature communications*, 2018, vol. 9 (1), iss. 5147.
17. Melnikov, V.P, Osipov, V.I., Brouchkov, A.V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022, vol. 112, pp. 231–251.
18. Miller, D.L., Johnson, L.A. Pile settlement in saline permafrost: a case history. Proceedings, 5th Canadian Permafrost Conference. Quebec, Que., 1990, pp. 371–378.
19. Sinitsyn, A., Løset, S. Strength of frozen saline silt under triaxial compression with high strain rate. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, vol. 48. https://doi.org/10.1007/s11204-011-9148-2
20. Streletskiy, D.A., Suter, L., Shiklomanov, N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14 (2), iss. 025003.
21. Tavakoli, S., Gilbert, G., Kydland, L.A.O., Frauenfelder, R., Forsberg, C.S. Geoelectrical properties of saline permafrost soil in the Adventdalen valley of Svalbard (Norway), constrained with in-situ well data. *Journal of Applied Geophysics*, 2021, vol. 195, iss. 104497. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104497