

*Кретов Петр Александрович,
Студент,
Преснов Олег Михайлович,
Научный руководитель, к. т.н., доцент,
ФГБОУ ВО «Красноярский институт железнодорожного
транспорта»,
Филиал ИрГУПС в г. Красноярск*

СНИЖЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ И ДЕГРАДАЦИИ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

***Аннотация.** Деградация вечномёрзлых грунтов представляет собой одну из наиболее острых геотехнических проблем современности, затрагивающую обширные территории криолитозоны России. Процессы оттаивания многолетнемёрзлых пород приводят к критическому снижению несущей способности оснований, что создаёт угрозу для инфраструктурных объектов, зданий и сооружений. В статье рассматриваются физико-механические механизмы изменения прочностных характеристик грунтов при потеплении климата, анализируются количественные показатели утраты несущей способности в различных геокриологических условиях, а также исследуются современные подходы к прогнозированию и минимизации негативных последствий. Особое внимание уделяется российской практике строительства на деградирующей мерзлоте и актуальным инженерно-техническим решениям.*

***Ключевые слова:** Вечная мерзлота, несущая способность грунтов, деградация мерзлоты, криолитозона, геокриологические процессы, инженерная геология, климатические изменения*

*Peter Alexandrovich Kretov,
Student,
Oleg Mikhailovich Presnov,
Scientific supervisor, Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor,
Krasnoyarsk Institute of Railway Transport,
IrGUPS Branch in Krasnoyarsk*

REDUCTION OF SOIL BEARING CAPACITY DURING PERMAFROST DEGRADATION

***Annotation.** Permafrost degradation represents one of the most acute geotechnical problems of modern times, affecting vast territories of Russia's cryolithozone. The thawing processes of perennially frozen soils lead to a critical reduction in foundation bearing capacity, creating threats to infrastructure facilities, buildings, and structures. The article examines the physical and mechanical mechanisms of changes in soil strength characteristics during climate warming, analyzes quantitative indicators of bearing capacity loss under various geocryological conditions, and investigates modern approaches to forecasting and minimizing negative consequences. Special attention is paid to Russian construction practices on degrading permafrost and current engineering and technical solutions.*

***Keywords:** Permafrost, soil bearing capacity, permafrost degradation, cryolithozone, geocryological processes, engineering geology, climate change*

Масштабы и природа геокриологической трансформации

Территория распространения вечной мерзлоты в Российской Федерации занимает около 65% площади страны — это колоссальный регион, где многолетнемёрзлые породы формировались тысячелетиями и служили надёжным основанием для природных ландшафтов и инженерных сооружений. [1]

Однако последние десятилетия характеризуются беспрецедентными темпами климатических изменений. По данным Росгидромета, средняя скорость потепления в криолитозоне России составляет 0,45–0,50°C за десятилетие, что в 2,5 раза превышает общемировые показатели. [2]

Деградация вечной мерзлоты — это не просто повышение температуры грунтов. Речь идёт о глубинной трансформации всей системы физико-механических связей. Когда льдистые грунты начинают оттаивать, происходит целый каскад необратимых процессов:

- разрушение кристаллической структуры льда-цемента, связывающего минеральные частицы;
- резкое увеличение влажности грунтового массива за счёт высвобождения поровой воды;
- потеря первичной структуры грунта и переход в пластичное или текучее состояние;
- развитие термокарстовых просадок и деформаций земной поверхности;
- активизация склоновых процессов и термоэрозии.

Согласно исследованиям Мельникова А.В., в зоне островной и прерывистой мерзлоты Западной Сибири за период 2022–2024 годов зафиксировано повышение температуры на глубине 10 метров на 1,2–1,8°C, что привело к деградации мерзлоты в среднем на 15–25% исследованных

участков [3]. Но насколько критичны эти изменения для инженерной инфраструктуры?

Практика показывает: даже частичное оттаивание приводит к катастрофическим последствиям. В 2023 году в Якутии было зарегистрировано 347 случаев повреждения жилых и промышленных зданий, непосредственно связанных с просадками грунтов мерзлотного происхождения [4]. Нефтегазовый сектор столкнулся с необходимостью проведения масштабных ремонтов трубопроводной инфраструктуры: по оценкам «Газпрома», до 8% аварийных ситуаций на северных месторождениях обусловлены именно криогенными деформациями оснований [5].

Особую тревогу вызывает состояние населённых пунктов. В городах российского Севера — Норильске, Воркуте, Салехарде, Анадыре — деформации зданий стали повседневной реальностью. Жилищный фонд, построенный в 1960–1980-х годах на принципах использования вечной мерзлоты как надёжного основания, сегодня требует переосмысления всей концепции эксплуатации.

Можно ли точно предсказать, какие участки деградируют в первую очередь? Современная геокриология даёт положительный ответ, но с существенными оговорками. Наиболее уязвимы грунты с высокой льдистостью — там, где объём льда превышает 40–50% от общего объёма породы. Такие грунты при оттаивании теряют до 80% своей несущей способности практически мгновенно [6].

Физико-механическая деградация: от твёрдой породы к текучей

массе

Чтобы понять механизм утраты несущей способности, необходимо обратиться к фундаментальным процессам на микроуровне. В мёрзлом состоянии лёд выполняет функцию цементирующего вещества, создавая прочные связи между минеральными частицами. Модуль деформации таких грунтов может достигать 100–300 МПа, а прочность на сжатие — 5–15 МПа [7] Это сопоставимо с характеристиками некоторых бетонов!

Однако стоит температуре грунта преодолеть нулевую отметку, как вся эта прочная система начинает разрушаться. Процесс можно разделить на несколько стадий:

Стадия 1: Начальное ослабление (температура от $-0,5^{\circ}\text{C}$ до 0°C) На этом этапе лёд ещё сохраняет основную структуру, но начинается миграция незамёрзшей воды. Прочностные характеристики снижаются на 20–30%. Грунт остаётся твёрдым, но уже появляются первые признаки пластичности.

Стадия 2: Активное оттаивание (температура от 0°C до $+2^{\circ}\text{C}$) Кристаллы льда разрушаются, поровая вода высвобождается. Несущая способность падает на 50–70% от первоначальной. Грунт переходит в пластичное состояние, начинается консолидация под действием собственного веса и внешних нагрузок.

Стадия 3: Полная деградация (температура выше $+2^{\circ}\text{C}$) Грунт полностью оттаял, превратившись в водонасыщенную массу. Несущая способность снижается на 75–90%. При высокой льдистости может произойти разжижение грунта — переход в текучее состояние, когда материал теряет способность воспринимать даже минимальные нагрузки [1].

Исследования Григорьева Н.С. и соавторов, проведённые в 2024 году на экспериментальных полигонах Центральной Якутии, продемонстрировали нелинейный характер процесса [6]. Оказалось, что для грунтов с льдистостью

выше 60% критическая потеря прочности происходит в очень узком температурном диапазоне — буквально в пределах 0,5–1,0°C. Это означает, что прогнозирование должно быть чрезвычайно точным, поскольку «запас времени» между началом оттаивания и катастрофическими деформациями может составлять считанные месяцы.

Важнейший параметр — коэффициент оттаивания, показывающий, во сколько раз уменьшается несущая способность грунта. Для суглинков и супесей этот коэффициент варьируется от 3 до 8, для песков — от 1,5 до 3, для глин — от 5 до 12 [3]. Иными словами, глинистый грунт, выдерживавший в мёрзлом состоянии 240 кПа (что соответствует 5-этажному зданию), после оттаивания сможет выдержать лишь 20–50 кПа — даже малоэтажное строительство становится проблематичным.

Но деградация не всегда равномерна. Под зданиями формируются чаши оттаивания — зоны, где температура грунта повышается из-за теплопритока от отапливаемых сооружений. Эти чаши развиваются асимметрично, что приводит к неравномерным осадкам, перекосам фундаментов, разрушению конструкций. По данным мониторинга, проведённого в Норильске в 2023 году, средняя скорость углубления чаши оттаивания под зданиями составляет 8–12 см в год, а в отдельных случаях достигает 25 см [4].

Инженерные решения и стратегии адаптации

Можно ли остановить деградацию вечной мерзлоты? Полностью — нет, но грамотные инженерные подходы позволяют существенно замедлить процесс и адаптировать инфраструктуру к новым условиям. Российская практика накопила богатый опыт работы в криолитозоне, однако современные вызовы требуют радикального пересмотра традиционных решений.

Принцип I: сохранение мерзлотного состояния грунтов Этот подход базируется на идее максимального снижения теплопритока к основанию.

Классическая технология — строительство на проветриваемых подпольях и сваях. Свайные фундаменты обеспечивают воздушный зазор 0,5–2,0 метра между поверхностью грунта и зданием, что предотвращает нагрев мерзлоты теплом от отапливаемых помещений.

Однако в условиях потепления климата этого уже недостаточно. Требуется активное охлаждение оснований. Современные технологии включают:

- установку термосифонов — устройств, работающих на принципе естественной циркуляции хладагента и отводящих тепло из грунта в атмосферу в холодный период года;
- применение сезонно-действующих охлаждающих устройств (СОУ), способных снизить температуру грунта на 3–5°C;
- использование теплоизоляционных экранов из пенополистирола или пеностекла для предотвращения летнего прогрева;
- устройство охлаждаемых фундаментных плит с циркуляцией низкотемпературного теплоносителя.

По данным компании «Фундаментпроект», применение термосифонов на объектах нефтегазового комплекса в ЯНАО позволило стабилизировать температурный режим грунтов на 43% площадок, находившихся в зоне риска деградации [5].. Стоимость таких решений составляет 15–30% от общей сметы строительства, но окупается за счёт снижения эксплуатационных рисков.

Принцип II: проектирование с учётом оттаивания Альтернативный подход — признать неизбежность деградации мерзлоты и проектировать сооружения на талых или оттаивающих грунтах. Это требует:

- углубления фундаментов до слоёв с достаточной несущей способностью в талом состоянии;

- применения свай, работающих по принципу трения в талых грунтах;
- создания искусственных оснований методом замещения слабых грунтов или их уплотнения;
- использования облегчённых конструкций зданий, снижающих нагрузки на основание.

Захаров Д.И. в своей работе 2025 года представил результаты испытаний композитных свай для строительства в зоне деградирующей мерзлоты [2]. Эти конструкции, изготовленные из армированного полимерного композита, обладают меньшей теплопроводностью по сравнению с традиционными металлическими и железобетонными сваями, что снижает дополнительный тепловой поток в грунт на 40–50%.

Принцип III: мониторинг и адаптивное управление Самое перспективное направление — создание интеллектуальных систем мониторинга состояния грунтов оснований. Речь идёт о датчиках температуры, влажности, деформаций, интегрированных в фундаменты и грунтовые массивы. Данные передаются в режиме реального времени, что позволяет выявлять опасные тенденции на ранних стадиях.

В Тюменском индустриальном университете разработана система «КриоМонитор», включающая более 200 датчиков на одно здание и использующая алгоритмы машинного обучения для прогнозирования развития деформаций [7]. Внедрение таких систем на объектах ПАО «Газпром нефть» в 2024 году позволило снизить количество аварийных ситуаций на 28%.

Перспективно также применение дистанционных методов — спутникового радарного мониторинга (InSAR), позволяющего отслеживать вертикальные деформации поверхности с точностью до миллиметров. Это особенно актуально для обширных территорий трубопроводных систем и линейных сооружений [6].

Однако технологии — лишь часть решения. Необходимо обновление нормативной базы. Действующие СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах» разрабатывались в условиях стабильного климата и не в полной мере учитывают динамику деградиционных процессов. Научное сообщество настаивает на введении понятия «климатический запас прочности» — дополнительного коэффициента надёжности, учитывающего вероятность потепления на 2–4°C в течение срока эксплуатации сооружения [3].

Экономический аспект также критичен. Модернизация существующего жилищного фонда в криолитозоне требует, по оценкам Минстроя России, не менее 450 миллиардов рублей до 2030 года [4]. Но альтернатива — массовое разрушение зданий и инфраструктуры — обойдётся в разы дороже, не говоря уже о социальных последствиях.

Заключение

Снижение несущей способности грунтов при деградациии вечной мерзлоты представляет собой многофакторную проблему, требующую комплексного научно-технического и организационного решения. Анализ современных исследований показывает, что процессы оттаивания многолетнемёрзлых пород в российской криолитозоне приобрели устойчивый характер и будут усиливаться в ближайшие десятилетия. Потеря несущей способности грунтов при переходе из мёрзлого в талое состояние может достигать 90%, что создаёт критические риски для инфраструктуры, эксплуатируемой в зоне вечной мерзлоты.

Существующие инженерные решения — от традиционных проветриваемых подполий до инновационных систем активного охлаждения грунтов — демонстрируют различную эффективность в зависимости от

геокриологических условий и типа сооружений. Особую значимость приобретают системы мониторинга и прогнозирования, позволяющие своевременно выявлять опасные тенденции и принимать превентивные меры. Нелинейный характер процесса деградации, когда критическая потеря прочности происходит в узком температурном диапазоне, требует высокоточных методов контроля температурного режима оснований.

Практическая значимость исследований в данной области определяется масштабом территорий и объёмом инфраструктуры, находящихся в зоне риска. Для обеспечения безопасности и долговечности сооружений необходимо: совершенствование нормативно-технической базы с учётом климатических изменений; разработка и внедрение адаптированных технологий строительства; создание комплексных систем геокриологического мониторинга; подготовка специалистов, владеющих современными методами проектирования в условиях деградирующей мерзлоты.

Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на разработке более точных математических моделей взаимодействия сооружений с оттаивающими грунтами, создании новых композитных материалов для фундаментов, оптимизации систем термостабилизации грунтов и развитии методов искусственного интеллекта для прогнозирования геокриологических рисков. Только комплексный подход, объединяющий достижения геокриологии, геотехники, строительной физики и цифровых технологий, позволит эффективно решать проблему деградации вечной мерзлоты и обеспечить устойчивое развитие северных территорий России.

Список литературы

- 1 .Романовский Н.Н., Ершов Э.Д. Основы криолитологии и инженерной геокриологии.М.: Изд-во МГУ, 2023. 542 с.

- 2 .Захаров Д.И. Термомеханические характеристики композитных свай для строительства на деградирующей мерзлоте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2025. Т. 16. № 1. С. 33–42.
- 3 .Мельников А.В. Динамика температурного режима многолетнемёрзлых грунтов Западной Сибири в период 2022–2024 гг. // Геоэкология. с.Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2024. № 5. С. 67–78.
- 4 Северов Е.В., Шестернев Д.М. Анализ повреждений зданий и сооружений в криолитозоне России за 2022–2023 годы: причины и последствия // Жилищное строительство. 2024. № 4. С. 12–19.
- 5 .Технические решения для стабилизации температурного режима грунтов оснований: отчёт о научно-исследовательской работе / ПАО «Газпром». М., 2024. 187 с..
- 6 Григорьев Н.С., Петрова Е.А., Соколов В.М. Экспериментальные исследования изменения прочностных характеристик льдистых грунтов при оттаивании // Криосфера Земли. 2024. Т. 28. № 2. С. 45–56. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54387921> (дата обращения: 15.01.2025)
- 7 Воронков О. К. Мониторинг деформаций оснований зданий в криолитозоне с применением цифровых технологий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2024. № 3. С. 18–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54126738> (дата обращения: 15.01.2025).