

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Тао Д., Алексеев А.Г., Брушков А.В. Длительная ползучесть мерзлых грунтов в многолетних испытаниях //

Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.73912 EDN: XEZWSY URL:

[https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=73912](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=73912)

## Длительная ползучесть мерзлых грунтов в многолетних испытаниях

**Тао Дачжи**

аспирант, Геологический факультет, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ [taoolga@yeah.net](mailto:taoolga@yeah.net)



**Алексеев Андрей Григорьевич**

доктор технических наук

Руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований НИИОСП им. Н.М. Герсегонова

109428, Россия, г. Москва, Рязанский р-н, ул. 2-я Институтская, д. 6 стр. 12

✉ [adr-alekseev@yandex.ru](mailto:adr-alekseev@yandex.ru)



**Брушков Анатолий Викторович**

доктор геолого-минералогических наук

Заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ имени МВ. Ломоносова

119234, Россия, г. Москва, р-н Раменки, тер. Ленинские Горы, д. 1

✉ [geocryology@mail.ru](mailto:geocryology@mail.ru)



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2025.2.73912

**EDN:**

XEZWSY

**Дата направления статьи в редакцию:**

27-03-2025

**Дата публикации:**

03-04-2025

**Аннотация:** Настоящее исследование посвящено длительной ползучести мерзлых засоленных грунтов (песка, супеси и суглинка) в условиях постоянных температур и механических нагрузок, образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на п-ве Ямал. Особое внимание уделено изучению динамики деформаций во времени при одноосном сжатии. Работа направлена на выявление закономерностей изменения скорости деформации, анализ стадии затухающей и незатухающей ползучести, а также на сопоставление экспериментальных данных с теоретическими моделями старения, упрочнения и течения. Эксперименты проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м в течение до 9 лет, что позволило исследовать долгосрочное поведение мерзлых грунтов. Результаты имеют важное значение для прогноза устойчивости оснований зданий в условиях вечной мерзлоты и предотвращения их разрушений. Методом исследования являлось длительное лабораторное испытание образцов мерзлых грунтов методом одноосного сжатия при постоянной температуре и нагрузке. Научная новизна данного исследования заключается в продолжительности экспериментов (до 9 лет), что существенно превышает временные рамки большинства ранее проведённых испытаний. В большинстве известных исследований максимальная продолжительность ползучих испытаний мерзлых грунтов в различных режимах не превышала нескольких месяцев. Впервые на большом временном интервале показано, что для песков и супесей наблюдается переход от неустойчивой стадии деформации к стабильной, в то время как для суглинков выявлены нелинейные зависимости, предположительно связанные с трещинообразованием и изменением внутренней структуры. Использование математических моделей позволило уточнить параметры прогноза деформаций, что имеет прикладное значение для инженерных расчётов. Полученные результаты повышают достоверность оценки устойчивости фундаментов и обеспечивают научную основу для проектирования зданий и сооружений в районах вечной мерзлоты.

**Ключевые слова:**

ползучесть мерзлых грунтов, одноосное сжатие, теория, длительное испытание, деформация, вечная мерзлота, инженерная геокриология, адмерминская подземная лаборатория, сооружение, затухающая ползучесть

**Введение**

Изменение климата и повышение среднегодовых температур в холодных регионах мира привели к значительным изменениям в строении и свойствах вечной мерзлоты. Климатические изменения сопровождаются деградацией мерзлых грунтов, что ставит под угрозу устойчивость инженерных сооружений, таких как транспортные магистрали и здания, расположенные в районах вечной мерзлоты [\[1, 2, 3\]](#). Одной из основных проблем является ползучесть мерзлых грунтов — процесс длительных деформаций при постоянной нагрузке, который влияет на устойчивость оснований зданий и сооружений [\[4, 5\]](#).

Ползучесть мерзлых грунтов обусловлена рядом факторов: типом грунта, содержанием льда, влажностью, температурой и величиной нагрузки [\[6\]](#). Наличие микротрещин и ледяных шлиров в структуре мерзлых грунтов, а также зависимость ползучести от

температуры делают эти материалы сложным объектом для прогнозирования [7]. Экспериментальные данные показывают, что мерзлые грунты проявляют затухающую ползучесть, которая состоит из начальной неустойчивой и стабильной стадий, и незатухающую ползучесть, где появляется третья стадия - течения с прогрессирующей скоростью [8, 9, 10].

Изучение длительных деформационных процессов в мерзлых грунтах представляет собой одну из ключевых задач современной инженерной геокриологии. В свое время Н.А.Цытович обобщил многолетние результаты исследований, подчеркнув значимость длительных экспериментов для оценки поведения грунтов в вечномерзлых условиях [11]. Важные результаты были представлены в работе [10], где были проведены длительные эксперименты, выявившие нелинейные зависимости ползучести мерзлых грунтов от температуры и криогенного строения. Эти данные имеют ключевое значение для прогнозирования устойчивости оснований сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Одной из важнейших проблем является длительность испытаний, так как предполагаемое затухание деформаций при компрессионном сжатии или одноосном (трехосном) сжатии, характерное для немерзлых грунтов, для мерзлых грунтов пока не имеет экспериментального обоснования. Есть вероятность того, что при длительной ползучести может происходить изменение скоростей деформаций, в том числе их увеличение, что имеет принципиальное значение для прогноза устойчивости фундаментов на мерзлых грунтах. К сожалению, максимальная длительность экспериментов по ползучести мерзлых грунтов в различных видах испытаний составляет не более первых месяцев [12], главным образом из-за трудностей поддержания постоянной температуры. Поэтому те редкие испытания, которые были сделаны, были проведены главным образом в России, в подземных лабораториях Игарки и Амдермы [13, 14]. Натурный эксперимент с полевым прессом был также сравнительно недавно проведен в Тибете [15]. В этом эксперименте со ступенчатыми нагрузками 0.09 МПа, 0.19 МПа and 0.29 МПа в течение 8 лет наблюдались затухающие деформации в условиях естественного температурного режима.

Существующие подходы к моделированию ползучести мерзлых грунтов можно разделить на эмпирические модели, построенные на основе регрессионного анализа [16], и реологические модели, описывающие поведение грунта через механические элементы, такие как пружины Гука и ньютоновские цилиндры [17]. Подчеркнем, что большинство исследований ползучести ограничивалось непродолжительными экспериментами (до нескольких месяцев), что создает трудности при прогнозировании длительных деформационных процессов.

В настоящем исследовании проведен анализ многолетних деформаций мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) методом одноосного сжатия в экспериментах, проведенных в Амдерминской подземной лаборатории [13, 8]. Цель работы заключалась в изучении динамики изменения скорости деформации во времени, оценке стабильности деформаций грунтов и уточнении параметров используемых моделей ползучести, что имеет важное значение для проектирования и эксплуатации сооружений в условиях вечной мерзлоты. Как известно [8], засоленные мерзлые грунты имеют низкую прочность и отличаются высокими деформационными характеристиками, поэтому в настоящей работе исследовались мерзлые грунты, распространенные на Арктическом побережье.

#### **Методика экспериментов**

В экспериментах использовались засоленные мерзлые образцы нарушенного сложения. Образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на п-ве Ямал в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014. Для получения образцов нарушенного сложения сухой грунт измельчался, смешивался с раствором морской соли заданной концентрации, чтобы достичь заданных значений засоленности и влажности. Процесс подготовки включал выдерживание образцов для равномерного распределения влаги в грунте в условиях эксикатора при положительной температуре, а также уплотнение образцов в обоймах с последующим промораживанием при температуре  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  для получения массивной криогенной текстуры. Промораживание осуществлялось в теплоизолированных контейнерах с односторонним охлаждением в течение 3–7 суток. После завершения процесса подготовки торцы образцов зачищались, фиксировались их размеры, масса, определялась льдистость. Для одноосного сжатия использовались цилиндрические образцы диаметром 45–50 мм и высотой 100 мм. До момента испытаний образцы хранились в подземной лаборатории камерах при температуре испытаний, обернутые в двойные полиэтиленовые оболочки, что предотвращало потерю влажности.

Испытания на одноосное сжатие проводились для определения характеристик ползучести мерзлых грунтов. Для испытаний использовались 18 образцов грунтов (песок, супесь и суглинок), из которых по 6 параллельных образцов предназначались для каждой серии опыта. Образцы закрепляли в приборе для одноосного сжатия. Применялись постоянные нагрузки для изучения длительных деформаций грунтов. Оборудование позволяло фиксировать осевые и поперечные деформации. Длительность экспериментов составляла до 10 лет. Испытания проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м, что обеспечивало относительную стабильность температурных условий с колебаниями не более  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в конечный период наблюдений до  $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Образцы помещались в тонкую резиновую оболочку и дополнительно в пластиковый стакан, частично наполненный снегом для предотвращения потери влаги. После испытаний проводились контрольные измерения, изменения льдистости образцов не зафиксировано. Физические свойства образцов приведены в табл. Полученные данные сопоставлялись с теоретическими моделями деформирования грунтов.

Таблица 1. Физические свойства засоленных мерзлых грунтов в длительных испытаниях

Грунт	T, °C	Засоленность, Dsal, %	Влажность	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Песок	-3	0,1	0,26	1,91
Супесь	-3	0,2	0,38	1,75
Суглинок	-3	0,5	0,46	1,68

### Результаты исследований

По полученным данным построены кривые длительного деформирования и скорости деформации для мерзлого морского песка, супеси и суглинка.

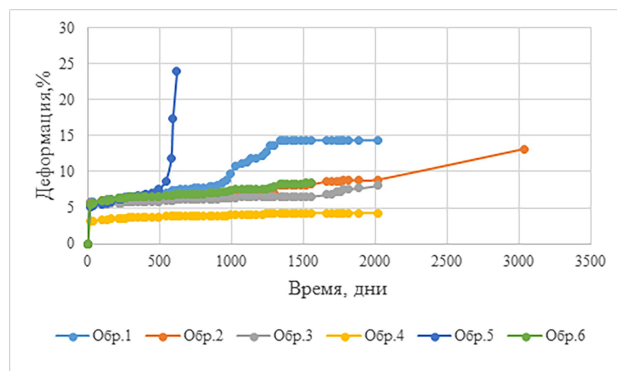


Рис.1. Кривые длительного деформирования мерзлого морского песка при засоленности 0,1%, плотность грунта 1,91 г/см<sup>3</sup>, плотность частиц 2,4 г/см<sup>3</sup>, влажность 0,26 и нагрузка 0,15 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

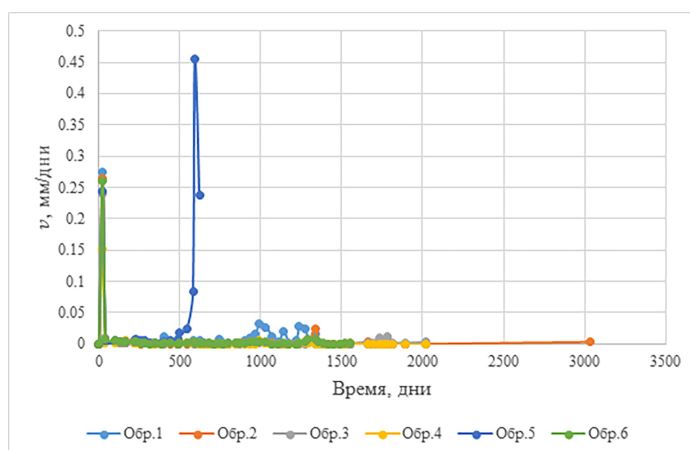


Рис.2. Кривые скорости деформации мерзлого песка. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

Длительная ползучесть засоленного мерзлого песка происходит с затухающей, постоянной и затем увеличивающейся во времени скоростью и заканчивается разрушением образцов, т.е. соответствует поведению мерзлых незасоленных образцов и результатам кратковременных испытаний (рис. 1). В отличие от мерзлых засоленных песков и мерзлых незасоленных пород засоленные глинистые мерзлые породы деформируются преимущественно с уменьшающейся скоростью - так же, как и в ранее проведенных кратковременных испытаниях [8].

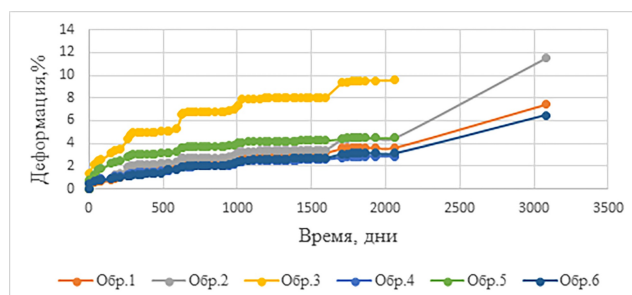


Рис.3. Кривые длительного деформирования мерзлой морской супеси при засоленности 0,2%, плотность грунта 1,75 г/см<sup>3</sup>, плотность частиц грунта 2,68 г/см<sup>3</sup>, влажность 0,38 и нагрузка 0,31 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

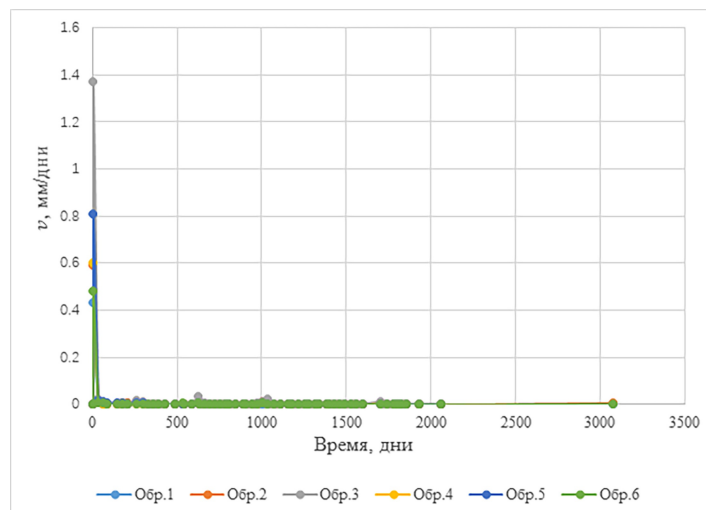


Рис.4. Кривые скорости деформации мерзлой супеси, цифрами обозначены номера образцов

Рис. 3 показывает, в процессе эксперимента происходит постепенное накопление деформации мерзлой супеси (засоленность 0,2%, влажность 0,38, плотность 1,75 г/см<sup>3</sup>) при температуре -3°C и нагрузке 0.31 МПа. На начальной стадии деформация увеличивается быстро, что связано, вероятно, с уплотнением структуры грунта и перераспределением напряжений. Со временем темпы деформации снижаются, что отражает переход к стадии стабилизации скорости ползучести. Скорость деформации изменяется нелинейно, что обусловлено, возможно, сложными процессами в структуре мерзлой супеси. Для отдельных образцов (например, образец 3) отмечаются резкие изменения скорости деформации, указывающие, вероятно, на локальные структурные изменения.

Рис. 4. показывает изменение скорости деформации мерзлой супеси со временем. На первой стадии скорость высока, но затем постепенно снижается, что соответствует затухающей фазе ползучести. В промежутке 1500–2000 дней скорость большинства образцов стабилизируется, что свидетельствует о завершении активных деформационных процессов. На некоторых участках (рис.4) наблюдаются колебания скорости деформации, связанные, возможно, с локальными изменениями структуры грунта.

Рассмотрим возможные причины колебания скорости деформации:

1. В некоторых опытах наблюдаются резкие скачки деформации (рис. 3). Вероятно, это объясняется неоднородным распределением порового льда и наличием микротрещин в структуре грунта. При воздействии нагрузки локальные разрушения вызывают резкие скачки деформации. Засоленность грунта может способствовать локальному перераспределению порового льда, что временно снижает прочность материала.

2. Возможна также перекристаллизация и режеляция льда (рис. 4) в поровом пространстве и миграция влаги под длительным воздействием нагрузки. Также возможны фазовые переходы (таяние и последующее замерзание) льда. Упрочнение структуры мерзлого грунта может происходить также за счет формирования ледяных шлиров, что может приводить к временной стабилизации деформаций.

3. Наблюдаются некоторые различия между образцами, что, вероятно, обусловлено структурной неоднородностью грунта, связанной с условиями подготовки образцов. Неравномерное распределение льда и соли внутри образцов могло привести к вариациям в деформационном поведении.

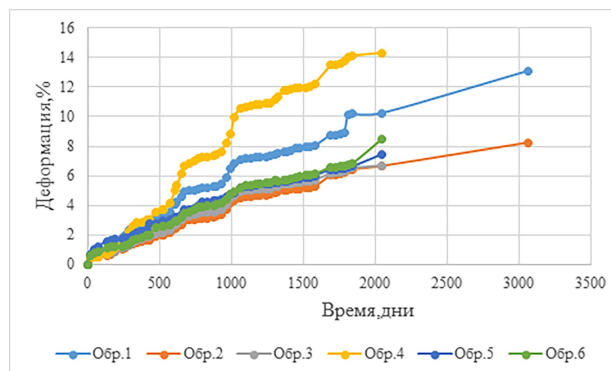


Рис.5. Кривые длительного деформирования мерзлого морского суглинка при засолённости 0,5%, плотности грунта 1,68 г/см<sup>3</sup>, плотности частиц 2,70 г/см<sup>3</sup>, влажность 0,46 и нагрузка 0,1 МПа. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

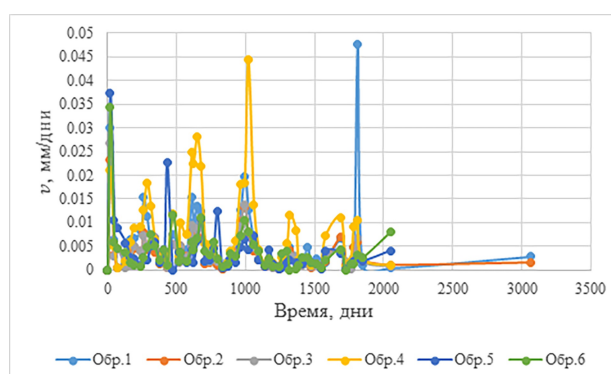


Рис.6. Кривые скорости деформации мерзлого суглинка. Температура -3°C, цифрами обозначены номера образцов

На Рис. 5 представлены графики деформации образцов мерзлого морского суглинка с засолённостью 0,5%, плотностью 1,68 г/см<sup>3</sup> и влажностью 0,46 при нагрузке 0,1 МПа и температуре -3°C. Кривые демонстрируют в целом затухающую деформацию во времени, характерную для мерзлых грунтов. На начальном этапе наблюдается интенсивное увеличение деформации, за которым следует стабилизация на более поздних стадиях. Однако образцы №4 и №5 выделяются аномальным поведением: фиксируются скачки или локальные отклонения в процессе деформации.

Рис. 6 иллюстрирует изменение скорости деформации во времени для тех же образцов. Общая тенденция соответствует двум фазам ползучести: первичной (затухающей) и вторичной (стабильной). При этом скорости деформации изменяются неравномерно, что выражается в виде колебаний. Особое внимание привлекает образец №5, который демонстрирует значительно более высокую начальную скорость деформации, что может быть связано с ослаблением межчастичных связей из-за неоднородного распределения льда в структуре грунта, или повышением напряжений в грунтовой матрице.

Вероятно, внезапные изменения на кривых деформации могут быть обусловлены локальным разрушением ледяных связей или перераспределением напряжений внутри грунтовой структуры. Для глинистых грунтов с высокой пористостью и значительным содержанием воды такие процессы являются типичными (Рис. 6). Возможно, изменения скорости деформации во времени вызваны несколькими факторами: перераспределением льда в поровом пространстве, а также формированием и закрытием микротрещин под нагрузкой, что вызывает локальные изменения структуры и приводит к временному ускорению или затуханию деформаций. Засолённость грунта (0,5%), вероятно, также оказывает влияние на фазовые переходы воды и льда и их

перераспределение, что способствует изменению деформационных характеристик.

### Модели длительной ползучести

К распространенным подходам относятся так называемые технические теории ползучести. Наиболее известными из них являются степенная и гиперболическая зависимости, основанные на положениях статистической механики (формула Эйринга), а также формула, описывающая теорию упрочнения. По другой теории (старения) устанавливается зависимость не между скоростью деформирования и напряжением, а между деформацией, напряжением и временем. Эта формула, известная как уравнение С.С. Вялова, получила широкое применение благодаря его исследованиям. Кроме того, существует ряд альтернативных подходов, используемых для описания ползучести мерзлых грунтов.

К полученным данным были применены три методики обработки, основанные на следующих формулах [12].

Во-первых, была использована формула так называемой технической теории старения:

$$\varepsilon = \left( \frac{\sigma}{\xi} t^{\alpha} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

Где  $t$  – время;  $\varepsilon$ -деформация;  $\sigma$ -напряжение;  $\xi$ ,  $\alpha, m$  –параметры.

во-вторых, теории упрочнения:

$$\varepsilon = \left( \frac{\sigma}{a} \right)^{\frac{1}{m}} t^{\alpha} \quad (2)$$

Где  $t$  – время;  $\varepsilon$ -деформация;  $\sigma$ -напряжение;  $a$ ,  $m$ ,  $\alpha$ -параметры.

и, в-третьих, теории течения:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = b \sigma^n \quad (3)$$

Где  $t$  – время;  $\varepsilon$ -деформация;  $\sigma$ -напряжение;  $b$ ,  $n$ -параметры.

Эксперименты, проведенные в течение 10 лет, позволили исследовать закономерности деформации грунта при длительном воздействии постоянного напряжения. Для каждого типа грунта было вычислено среднее значение деформации, которое использовалось для описания общей тенденции изменения деформации. На основе полученных данных выполнена аппроксимация, направленная на определение параметров используемых моделей. Итоговые результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных параметров деформации в кратковременных и длительных испытаниях для различных грунтов

Теория		Старения			Упрочнения			Течения	
Грунт	Дни	$\xi$	$\alpha$	$m$	$\xi$	$a$	$m$	$b$	$n$
Песок	41	0.005	0.007	2.282	0.020	0.041	1.128	0.800	0.007



Песок	41	0,005	0,097	2,383	0,029	0,041	1,138	0,800	0,907
	2021	0,005	0,584	3,967	0,010	0,147	3,209	1,887	3,125
Супесь	32	0,865	0,145	1,593	0,865	0,090	1,593	0,469	2,576
	2063	4,835	0,502	0,758	8,667	0,662	0,919	0,967	5,167
Сугли- нок	49	8,730	0,882	3,186	1,297	0,277	1,826	0,999	1,779
	2049	4,168	0,770	1,096	7,428	0,703	1,266	1,480	2,589

У супесей и суглинков в трех моделях параметры ( $\sigma$ ,  $m$ ,  $b$ ,  $n$ ) значительно различаются между краткосрочным и долгосрочным периодами. У песков изменения параметров ( $\square$ ,  $a$ ) минимальны, поэтому краткосрочные модели с экстраполяцией трендов могут быть приемлемы для долгосрочного прогноза. Строительным конструкциям требуется определенный запас прочности, так как кратковременные испытания не позволяют надежно оценить деформации за десять лет.

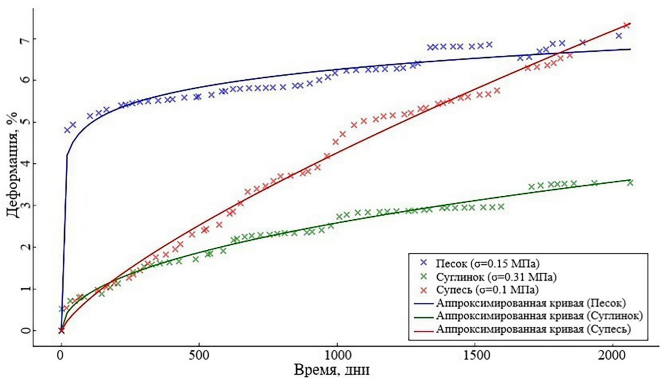


Рис. 7. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории старения для разных типов мерзлых грунтов

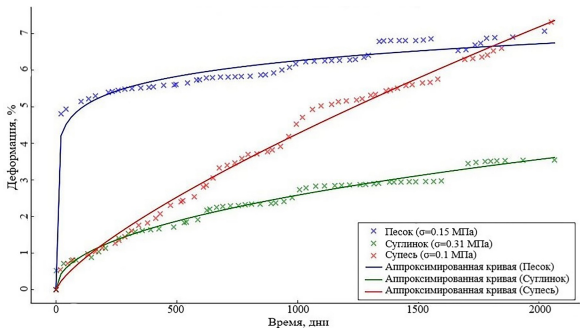


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории упрочнения для разных типов мерзлых грунтов

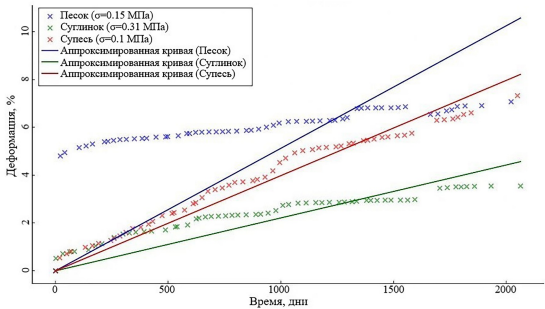


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести на основе теории течения для разных типов мерзлых грунтов

Для оценки точности предсказаний каждой теории было дополнительно выполнено

вычисление средней ошибки (MSE, %) для расхождения между экспериментальными данными и теоретическими значениями. Среднеквадратическая ошибка, как известно, это мера точности, позволяющая сравнивать ошибки прогнозирования различных моделей для определенного набора данных [18]. Среднеквадратичная ошибка (MSE, %) для теорий старения и упрочнения для песка составляет около 5%. Для теории течения MSE для песка значительно выше и достигает 37%. Для мерзлой морской супеси по теории старения и упрочнения MSE составляет около 14%, а по теории течения 28%. Для мерзлого морского суглинка по теории старения и упрочнения MSE составляет 8%, а по теории течения - 18%.

### Обсуждение результатов

Настоящее исследование направлено на изучение длительной ползучести мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) в условиях постоянных температур и нагрузок, с акцентом на изменение скорости деформаций во времени. Анализ экспериментальных данных проведен с использованием теорий старения, упрочнения и течения, что позволило не только подтвердить существующие теоретические положения, но и выявить новые закономерности, важные для инженерной практики.

Пески демонстрируют минимальную ползучесть, а супесь и суглинок, обладающие большей пористостью и содержанием льда, в большей степени подвержены деформациям. Подтверждена низкая скорость деформаций песков (на 20-30% меньше, чем у супеси и суглинков). В супеси наблюдались структурные аномалии, связанные с неоднородным распределением льда, что было описано ранее [19].

В ходе экспериментов на всех типах грунтов (песке, супеси и суглинке) зафиксировано, что при низких нагрузках наблюдается затухающая ползучесть, стабилизирующаяся в течение 10 лет наблюдений. Эти данные согласуются с результатами [10], которые также наблюдали стабилизацию скоростей при умеренных нагрузках.

Для супеси и суглинка наблюдалось образование ледяных шлиров в процессе эксперимента, стабилизирующих структуру грунта при низких температурах. Это уменьшало скорость деформации, особенно в начальный период. Эти наблюдения согласуются с выводами [4], но дополняют их, описывая долгосрочные эффекты стабилизации, которые не рассматривались в предыдущих исследованиях. В определенном диапазоне засоленности засоленные грунты, в отличие от незасоленных, продемонстрировали меньшую склонность к разрушению. Например, супесь с засолением 0,2% имела более низкую скорость деформации при одной и той же температуре (-3°C), чем песок с меньшим содержанием соли. Это подтверждает более ранние результаты о том, что засоленность укрепляет ледяные структуры в грунте и увеличивает их устойчивость [17].

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность применения теорий старения и упрочнения для описания ползучести мерзлых грунтов. Обе теории демонстрируют высокую точность на начальных и промежуточных стадиях деформации для различных типов грунтов, таких как песок, супесь и суглинок. Это согласуется с выводами, представленными в работе Вялова С.С., где подчеркивается значимость учета временных факторов при моделировании деформационных процессов в мерзлых грунтах [12]. Однако на поздних стадиях деформации наблюдается снижение точности моделей старения и упрочнения. Это может быть связано с усложнением реологических процессов, что подтверждает мнение Н.А. Цытовича,, отмечавшего необходимость учета

сложных нелинейных свойств мерзлых грунтов [\[11\]](#).

Теория течения показала значительно меньшую точность, особенно на поздних этапах деформации. Ограничения теории течения обсуждаются в работе Роман Л.Т., где подчеркивается необходимость введения нелинейных поправок для повышения точности моделей [\[20\]](#). Применимость каждой из моделей в инженерной практике зависит от требуемой точности и сложности расчетов. Введение нелинейных поправок или использование более сложных математических моделей может повысить точность теории течения, особенно на поздних стадиях деформации.

Настоящее исследование проводилось на протяжении 10 лет, что позволило наблюдать долгосрочные изменения, включая стабилизацию скоростей деформации. Большинство других исследований ограничивалось краткосрочными наблюдениями, что не позволяло фиксировать подобные эффекты [\[21\]](#)

### Выводы

1. Многолетние экспериментальные исследования показали, что длительная ползучесть мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) имеет выраженные стадии деформации: начальную затухающую, стабилизирующуюся и (в отдельных случаях) ускоряющуюся. Для песков и супесей характерна стабилизация скорости деформации, в то время как суглинки демонстрируют сложное нелинейное поведение, связанное, возможно, с трещинообразованием и локальными процессами восстановления структуры.

2. Для супесей и суглинков характерны сложные деформационные зависимости, обусловленные, вероятно, неоднородным распределением льда и особенностями пористой структуры. Засоленные грунты демонстрируют меньшую деформируемость по сравнению с незасоленными образцами в определенном диапазоне концентрации засоленности.

3. Теории старения и упрочнения удовлетворительно описывают процессы ползучести мерзлых грунтов на начальных и промежуточных стадиях деформации, что подтверждается низкими значениями MSE. Теория течения имеет ограниченную применимость. Для повышения точности моделей рекомендуется введение нелинейных поправок или использование более сложных математических описаний, учитывающих реологические свойства мерзлых грунтов.

4. Полученные данные имеют ключевое значение для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты. Результаты позволяют прогнозировать долгосрочные деформационные процессы и повысить надежность оснований зданий и инженерных сооружений.

### Библиография

1. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В. и др. Опыт эксплуатации сооружений и необходимость управления тепловым режимом грунтов в криолитозоне // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 742-756.
2. Li, X., Cheng, G.D. A GIS-aided response model of high altitude permafrost to global change // Science in China (Series D). 1999. № 42(1). С. 72-79.
3. Yu, F., Qi, J.L., Yao, X.L., Liu, Y.Z. In-situ monitoring of settlement at different layers under embankments in permafrost regions on the Qinghai-Tibet Plateau // Engineering Geology. 2013. № 160. С. 44-53.
4. Qi, J., Wen, Z., Zhang, J. Settlement of embankments in permafrost regions in the

- Qinghai-Tibetan plateau // Norwegian Journal of Geography. 2007. № 61(2). С. 49-55.
5. Ma, W., Qi, J.L., Wu, Q.B. Analysis of the deformation of embankments on the Qinghai-Tibet railway // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2008. № 134(11). С. 1645-1654.
6. Bronfenbrener, L., Bronfenbrener, R. Creep characteristics of frozen soils under conditions of small strains // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79. С. 84-91.
7. Bray, M.T. The influence of cryostructure on the creep behavior of ice-rich permafrost // Cold Regions Science and Technology. 2012. № 79-80. С. 43-52.
8. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 330 с.
9. Zhou, X., Guo, L., Li, Z. Multiaxial creep of frozen loess // Mechanics of Materials. 2016. № 95. С. 172-191.
10. Song, Y., Zhang, Y., Li, C. Creep characteristics and constitutive model for frozen mixed soils // Journal of Mountain Science. 2021. № 18(7). С. 1966-1976.
11. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Москва: Изд-во МГУ, 1973.
12. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов // Под редакцией В.Н. Разбегина. Москва: Стройиздат, 2000.
13. Роман Л.Т., Брушков А.В., Магомедгаджиева А.М. Оценка достоверности определения длительной деформации мерзлых засоленных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1996. № 2. С. 20-24.
14. Брушков А.В., Аксёнов В.И. Определение характеристик ползучести засоленных мерзлых грунтов из опытов на одноосное сжатие // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений: Сб. нач. тр. М.: "Наука", 1999. С. 83-90.
15. Zhang, H., Zhang, J., Zhang, Z., Chen, J., and You, Y. A consolidation model for estimating the settlement of warm permafrost // Computers and Geotechnics. 2016. № 76. С. 43-50.
16. Liingaard, M., Augustesen, A.H., Lade, P.V. Characterization of models for time-dependent behavior of soils // International Journal of Geomechanics. 2004. № 4(3). С. 157-177.
17. Chen, J., Yang, X., Li, D. A long-term strength criterion for frozen clay under complex stress states // Cold Regions Science and Technology. 2020. № 176. С. 103089.
18. Hyndman, R.J., Koehler, A.B. Another look at measures of forecast accuracy // International Journal of Forecasting. 2006. № 22(4). С. 679-688.
19. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАЙК "Наука"/Интерпериодика, 2002. 426 с.
20. Роман Л.Т., Котов П.И. Определение вязкости мерзлых грунтов шариковым штампом // Криосфера Земли. 2013. Т. 17, № 4. С. 30-35.
21. Benedict, J.B. Frost creep and gelifluction features: A review // Quaternary Research. 1976. № 6. С. 55-76.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предметом исследования является изучение процесса длительной ползучести мерзлых грунтов в многолетних испытаниях.

Научные исследования в данном направлении достаточно актуальны, поскольку климатические изменения на планете и повышение среднегодовых температур в холодных регионах мира привели к значительным изменениям в строении и свойствах

вечной мерзлоты, сопровождающихся деградацией мерзлых грунтов. Это ставит под угрозу устойчивость инженерных сооружений расположенных в районах вечной мерзлоты. Ползучесть мерзлых грунтов – это процесс длительных деформаций при постоянной нагрузке, который влияет на устойчивость оснований зданий и сооружений. Она обусловлена рядом факторов (типом грунта, содержанием льда, влажностью, температурой и величиной нагрузки). Наличие микротрещин и ледяных шлиров в структуре мерзлых грунтов, а также зависимость ползучести от температуры делают эти материалы сложным объектом для прогнозирования. В связи с этим исследования, выполненные автором, вносят большой научный вклад в изучение вопроса длительной ползучести мерзлых грунтов.

Методология исследования. В настоящем исследовании проведен анализ многолетних деформаций мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) методом одноосного сжатия в экспериментах, проведенных в Амдерминской подземной лаборатории. В экспериментах использовались засоленные мерзлые образцы нарушенного сложения. Образцы мерзлых грунтов отбирались из современных морских и аллювиальных четвертичных отложений в природных условиях на полуострове Ямал в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2014. Для получения образцов нарушенного сложения сухой грунт измельчался, смешивался с раствором морской соли заданной концентрации, чтобы достичь заданных значений засоленности и влажности. Промораживание грунтов до  $-20^{\circ}\text{C}$  осуществлялось в теплоизолированных контейнерах с односторонним охлаждением в течение 3–7 суток. После завершения процесса подготовки торцы образцов зачищались, фиксировались их размеры, масса, определялась льдистость. Для одноосного сжатия использовались цилиндрические образцы диаметром 45–50 мм и высотой 100 мм. Для испытаний использовались 18 образцов грунтов (песок, супесь и суглинок). Образцы закрепляли в приборе для одноосного сжатия. Применялись постоянные нагрузки для изучения длительных деформаций грунтов. Длительность экспериментов составляла до 10 лет. Испытания проводились в подземной лаборатории Амдерминской мерзлотной станции на глубине 14 м

Научная новизна заключается в том, что выполнены многолетние исследования мерзлых грунтов, распространенных на Арктическом побережье. Изучение длительных деформационных процессов в мерзлых грунтах представляет собой одну из ключевых задач современной инженерной геокриологии.

Цель работы заключалась в изучении динамики изменения скорости деформации во времени, оценке стабильности деформаций грунтов и уточнении параметров используемых моделей ползучести, что имеет важное значение для проектирования и эксплуатации сооружений в условиях вечной мерзлоты.

Стиль статьи – научный. Статья очень информативная, снабжена табличным и иллюстративным материалом, что придает ей значимое преимущество. Эксперименты, проведенные в течение 10 лет, позволили исследовать закономерности деформации грунта при длительном воздействии постоянного напряжения. Для каждого типа грунта было вычислено среднее значение деформации, которое использовалось для описания общей тенденции изменения деформации. На основе полученных данных выполнена аппроксимация, направленная на определение параметров используемых моделей. По своему объёму статья соответствует требованиям журнала.

Библиография статьи включает в себя 21 литературный источник, 13 из которых – на иностранном языке. Однако, следует отметить, что практически все литературные источники (за исключением 3-х), используемые в статье, довольно старые (более, чем 15-летней давности). Желательно, чтобы в статьях журналов списка ВАК большая половина источников была не старше 7-10 лет.

Выводы в статье лаконичны и передают основную мысль автора по проведенным

результатам исследований. Автор приходит к выводу, что длительная ползучесть мерзлых грунтов (песка, супеси и суглинка) имеет выраженные стадии деформации: начальную затухающую, стабилизирующуюся и (в отдельных случаях) ускоряющуюся. Для песков и супесей характерна стабилизация скорости деформации, в то время как суглинки демонстрируют сложное нелинейное поведение, связанное, возможно, с трещинообразованием и локальными процессами восстановления структуры. Засоленные грунты демонстрируют меньшую деформируемость по сравнению с незасоленными образцами в определенном диапазоне концентрации засоленности.

Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на использованные литературные источники и выражении авторского мнения по изучаемой проблеме.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна, полезна ученым и практикам грунтоведам и мерзлотоведам, поскольку полученные данные имеют ключевое значение для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений в условиях вечной мерзлоты. Результаты позволяют прогнозировать долгосрочные деформационные процессы и повысить надежность оснований зданий и инженерных сооружений.

Данная статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика».