

Арктика и Антарктика*Правильная ссылка на статью:*

Тао Д., Брушков А.В., Сафонов Е.В., Чеверев В.Г., Алексеев А.Г., Горбунова А.А., Мельников М.И., Кубаев В.А. Исследование ползучести мерзлых грунтов с применением различных моделей деформирования // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.74675 EDN: XBVWJG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74675

Исследование ползучести мерзлых грунтов с применением различных моделей деформирования

Тао Дацхи

аспирант; Геологический факультет; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

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

✉ taooolga@yeah.net

Брушков Анатолий Викторович

доктор геолого-минералогических наук

Заведующий кафедрой геокриологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

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

✉ geocryology@mail.ru

Сафонов Евгений Викторович

научный сотрудник; геологический факультет; МГУ имени М.В. Ломоносова

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

✉ evgenii567@yandex.ru

Чеверев Виктор Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук

заведующий лабораторией; геологический факультет; МГУ имени М.В. Ломоносова

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

✉ cheverev44@mail.ru

Алексеев Андрей Григорьевич

доктор технических наук

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

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

✉ adr-alekseev@yandex.ru

Горбунова Алина Александровна

аспирант; Геологический факультет; МГУ имени М.В. Ломоносова

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

✉ gorbunova.alina2000@yandex.ru



Мельников Михаил Исметович

аспирант; Геологический факультет; МГУ имени М.В. Ломоносова

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

✉ mikele99@mail.ru



Куваев Василий Анатольевич

младший научный сотрудник; лаборатория инженерной геокриологии; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, респ. Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

✉ vak-89@bk.ru



[Статья из рубрики "Грунты холодных равнинных и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.74675

EDN:

XBVWJG

Дата направления статьи в редакцию:

29-05-2025

Дата публикации:

05-06-2025

Аннотация: Предметом исследования является длительная ползучесть мерзлых глинистых грунтов при отрицательных температурах. В отличие от большинства предыдущих работ, основанных на краткосрочных испытаниях, в данной работе реализован подход, основанный на длительном (8–20 суток) лабораторном нагружении образцов методом одноосного сжатия. Объектами исследования выступают каолиновая глина, аллювиальные супесь и суглинок, отобранных в районе Марре-Сале и г. Москвы. Целью является количественное определение параметров деформационного поведения мерзлых грунтов и выбор наиболее адекватной модели их описания. Рассматриваются стадии ползучести и влияние структуры на скорость деформаций. Полученные данные

сопоставлены с результатами аппроксимации четырьмя моделями деформирования — упрочнения, степенной, Бюргерса и Нисихары — для последующего применения в прогнозах устойчивости инженерных сооружений в условиях криолитозоны. Методология включает длительные лабораторные испытания мерзлых глинистых грунтов методом одноосного сжатия при температуре -5°C с применением комплекса «ИВК Механика-теплофизика». Использованы 6 образцов каолиновой глины и по одному образцу супеси и суглинка. Результаты аппроксимированы по четырём математическим моделям ползучести. Научная новизна работы заключается в комплексном экспериментальном исследовании ползучести мерзлых грунтов различного состава в течение длительного времени и количественном сравнении эффективности математических моделей для описания реологического поведения этих грунтов. Впервые в условиях продолжительных испытаний при постоянной нагрузке была проведена аппроксимация экспериментальных данных с использованием четырёх моделей, что позволило выявить их достоинства и ограничения. Установлено, что модели упрочнения и степенная модель наиболее точно описывают деформационное поведение всех типов грунтов ($R^2 > 0,99$). Модель Бюргерса демонстрирует удовлетворительные результаты, но недооценивает деформации на поздних стадиях. Модель Нисихары требует модификации для адекватного описания ускоренной стадии. Полученные результаты имеют практическое значение для оценки надёжности фундаментов в криолитозоне, а также для совершенствования реологических моделей мерзлых грунтов.

Ключевые слова:

мерзлые глинистые грунты, экспериментальные исследования, деформация, одноосное сжатие, модель ползучести, нагрузка, инженерная геокриология, длительная ползучесть, реологические свойства, криолитозона

Введение

В последние десятилетия, изменение климата и повышение среднегодовых температур в районах криолитозоны привели к значительным изменениям в строении и свойствах многолетнемерзлых грунтов. Климатические изменения сопровождаются деградацией мерзлых грунтов, что ставит под угрозу устойчивость зданий и сооружений в криолитозоне [1].

Мерзлые грунты обладают выраженными реологическими свойствами, включая ползучесть, снижение прочности во времени и релаксацию напряжений. Эти явления связаны с взаимодействием компонентов грунта, где основную роль играет лёд как идеальное реологическое тело [2].

В мерзлых грунтах, как и всех твердых телах, используются различные критерии разрушения в зависимости от стадий ползучести [3]. Экспериментальные данные показывают, что мерзлые грунты, особенно засоленные, проявляют выраженную ползучесть, которая состоит из начальной стадии деформирования с уменьшающейся скоростью и стабильной стадии, а также незатухающую (прогрессирующую) ползучесть (деформирования с увеличивающейся скоростью) [4, 5].

Редкие длительные испытания одноосного сжатия, которые были сделаны, были проведены главным образом в России, в подземных лабораториях Игарки и Амдермы [6].

[\[7\]](#). Натурный эксперимент с полевым прессом был также сравнительно недавно проведен в Тибете [\[8\]](#). В Тибете также проводились долгосрочные испытания на ползучесть путем статического нагружения фундамента в ходе геотехнических испытаний на месте [\[9\]](#).

При инженерных изысканиях деформационные характеристики мерзлых грунтов определяются преимущественно методом лабораторных механических испытаний [\[10\]](#). Особое внимание уделяется одноосным испытаниям мерзлых льдистых глин, как наиболее деформируемых грунтов. Моделирование деформаций мерзлых грунтов является одним из важных направлений геотехники в связи с ростом строительства в холодных регионах. В отличие от немерзлых, такие грунты обладают сложным поведением из-за льда, фазовых переходов, температурной и временной зависимости, что осложняет разработку универсальных моделей [\[11\]](#).

Первые подходы к моделированию основывались на эмпирических зависимостях, полученных из испытаний на ползучесть. Для мерзлых грунтов С.С.Вялов разработал степенные, логарифмические и дробно-линейные модели, а также вывел уравнение ползучести, основанное на технической теории упрочнения и течения [\[12, 2\]](#).

В дальнейшем были предложены усовершенствованные модели. Модель Нисихары (Nishihsara Model) [\[13\]](#) была модифицирована с учётом нелинейных элементов и коэффициента повреждения для более точного описания ускоренной стадии ползучести [\[14\]](#). Shao и др провели лабораторные испытания на ползучесть мерзлого грунта с Цинхай-Тибетского плато при одноосном сжатии и, модифицировав традиционную модель Нисихары (Nishihsara model) путём введения параметра повреждения D, разработали усовершенствованную модель ползучести, описывающую начальную, стабильную и ускоренную стадии деформации [\[15\]](#). Не и др исследовали ползучесть на контакте мерзлого грунта и бетона, дополнительно усовершенствовав модель Нисихары за счёт внедрения нелинейных вязких элементов и параметра повреждения, что повысило точность моделирования ускоренной стадии ползучести [\[14\]](#). Также получила развитие модель Бюргерса (Burgers Model). Yao и др ввели упруго-повреждающий элемент и использовали специальный алгоритм для оптимизации параметров, что повысило точность описания всего процесса ползучести мерзлого грунта [\[16\]](#). Модель Кельвина-Фойгта (Kelvin-Voigt Model) часто используется как основа для построения более сложных моделей. На её базе Chen и др разработали модель дробного порядка, способную учитывать температурную и напряжённую зависимость деформаций [\[17\]](#).

Для более точного описания длительных процессов деформации была предложила модель с обобщенным линейным элементом, основанная на интегральном соотношении Больцмана-Вольтерра [\[18\]](#). Кроме того, в работе [\[19\]](#) на основе лабораторных исследований была выведена упрощенную формулу для описания ползучести льдонасыщенных грунтов при температурах, близких к нулю. Однако, большинство перечисленных работ было выполнено на основе кратковременных испытаний. Основной целью настоящего исследования является изучение длительной ползучести мерзлых грунтов методом одноосного сжатия и определение конститутивной модели мерзлых грунтов, которая имеет важное значение для точного описания и прогнозирования их механического поведения, способного обеспечить теоретические рекомендации по вопросам безопасности и устойчивости инженерных проектов в условиях холодного региона.

Методика экспериментов

Лабораторные методы определения деформационных характеристик мерзлых грунтов регламентируются ГОСТ 12248-2020 [20]. При этом одним из распространенных методов является метод одноосного сжатия, который использовали и мы. Во многих работах ползучесть мерзлых грунтов также исследуется методом одноосного сжатия [21, 22, 6, 7, 5].

В данной работе ползучесть мерзлых грунтов изучалась методом одноосного сжатия с использованием экспериментального комплекса «ИВК Механика-теплофизика», который разработан Е.В.Сафоновым и В.Г.Чеверевым и зарегистрированного как программа для ЭВМ (правообладатель-лаборатория геоинновационных технологий МГУ). Данный подход позволил получить количественные характеристики деформационного поведения глинистых грунтов при отрицательных температурах.

Основным устройством экспериментального комплекса являлся силовой блок осевого нагружения БОН.1.600.3 (рис.1), предназначенный для проведения компрессионных и одноосных испытаний, а также тестов на вдавливание. Он обеспечивает температурный диапазон от -15°C до $+35^{\circ}\text{C}$, нагрузку от 0,15 до 4,5 кН, и позволяет тестировать образцы размерами от 50×100 мм до 70×140 мм. Предел допускаемой основной погрешности измерения перемещений: $\pm 0.01\text{мм}$. Устройство применяется для передачи механического воздействия на образцы и регистрации их прочностных и деформационных параметров.

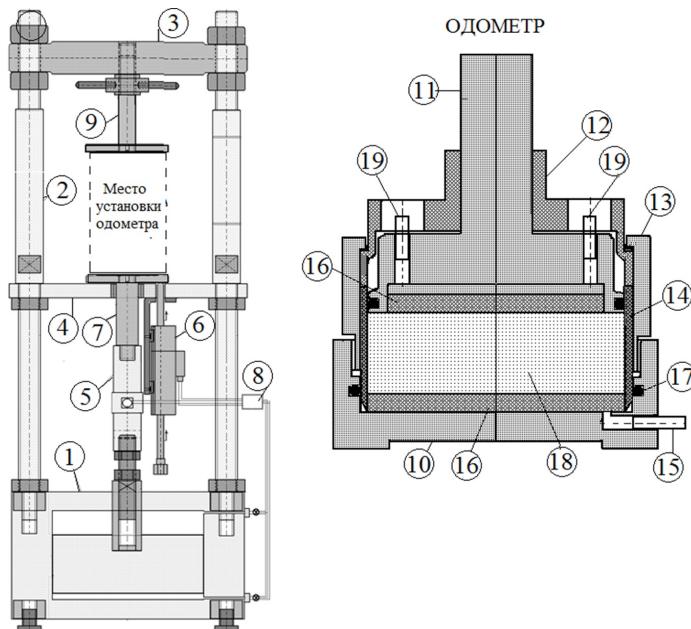


Рис. 1. Блок осевого нагружения БОН.1.600, укомплектованный одометром

1-пневмоцилиндр, 2-стойка, 3-траверса, 4-платформа, 5-датчик силы, 6-датчик положения, 7-шток столика, 8-АСУ, 9-упор, 10-стакан, 11-пуансон, 12-крышка, 13-прижимное кольцо, 14-кольцо, 15-штуцер нижний, 16-диск дренажный, 17-кольцо резиновое, 18-образец грунта, 19-штуцер.

Программа «ИВК Механика-теплофизика» осуществляет управление экспериментом, обработку данных и визуализацию результатов. Ее функционал включает задание параметров испытаний (нагрузка, температура, время стабилизации), фиксацию результатов и построение графиков зависимости деформации от времени и нагрузки.

Перед испытаниями образцы насыщались влагой, охлаждались и замораживались при заданной температуре (-5,0 °C). Далее они помещались в одометр и подвергались ступенчатому одноосному нагружению с шагом 0,5 кН. Все параметры – нагрузка, температура ($\pm 0,1$ °C), время стабилизации и деформация – фиксировались программой в режиме реального времени. На каждом этапе регистрировались кривые «напряжение–время», «деформация–время» и «деформация–напряжение», позволяющие построить реологические зависимости. Максимальное время испытаний составляло около 20 суток.

Применение комплекса обеспечило высокую точность измерений и позволило достоверно оценить реологическое поведение мерзлых грунтов в лабораторных условиях.

Подготовка образцов для лабораторных исследований

Для проведения лабораторных испытаний были подготовлены два типа грунтов: каолиновая глина (происхождение – г. Москва, геологический индекс- eP_2), аллювиальные супеси и суглинки, отобранные из скважины № 17 стационара Марре-Сале.

Подготовка образцов включала несколько последовательных этапов:

1. Первичная обработка. Исходный сухой грунт просеивался через сито с размером ячеек 0,2 мм для удаления крупных включений и обеспечения однородного гранулометрического состава. Затем образцы сушились в сушильном шкафу при температуре 105 °C в течение 24 часов до достижения воздушно-сухого состояния, что исключает влияние естественной влаги на результаты эксперимента.
2. Увлажнение до требуемого состояния. Для придания образцам пластичности, необходимой для формования и последующих испытаний, в каолиновую глину и ямальские грунты добавлялась вода. Влажность доводилась до уровня, соответствующего влажности текучести, определенной для данного типа грунта. Вода вводилась порционно с тщательным перемешиванием, обеспечивая равномерное распределение влаги по всему объёму.
3. Формование образцов. Увлажненные грунты помещались в цилиндрические формы диаметром 46 мм и высотой 92 мм – геометрические параметры, соответствующие требованиям к одноосным испытаниям. Уплотнение производилось вручную, с контролем равномерности распределения массы внутри формы.
4. Замораживание. Сформированные образцы замораживались в морозильной камере при заданных отрицательных температурах. Этот этап позволял имитировать реальные условия промерзания и способствовал стабилизации структуры образцов перед проведением механических испытаний (рис. 2.).

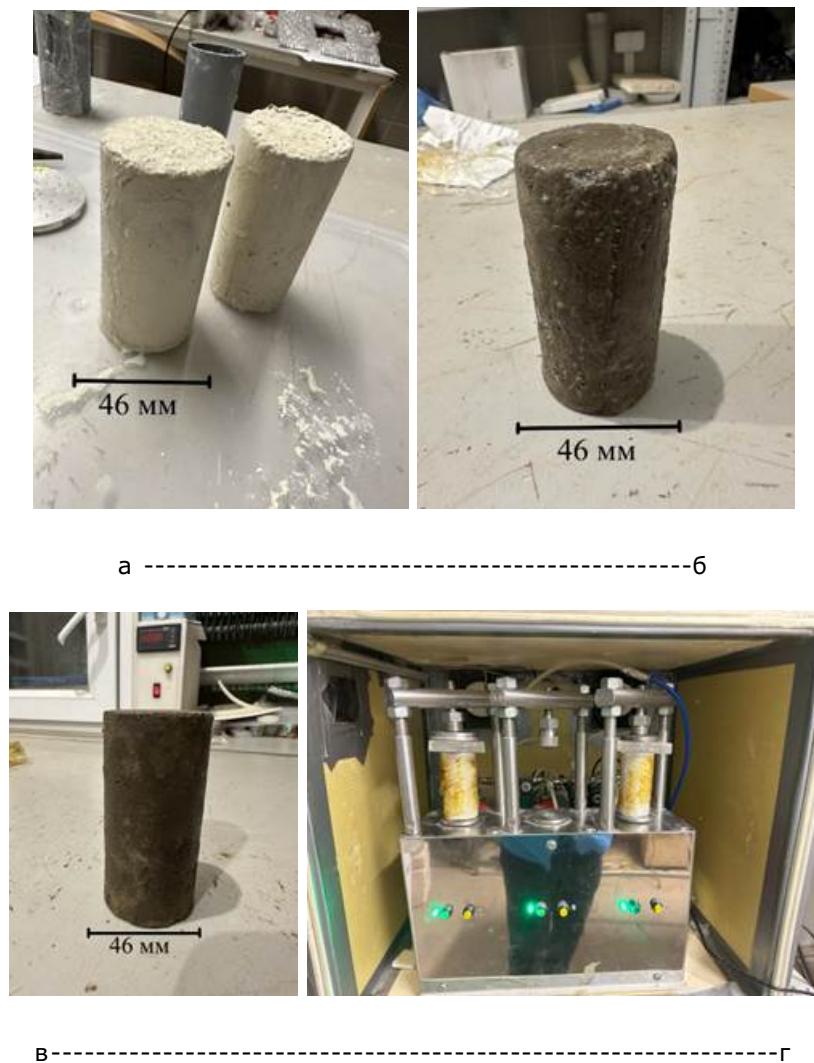


Рис. 2. а-каолинитовая глина, б-супесь, в-суглинок, г-образцы при испытаниях

Перед проведением испытаний были определены основные физико-механические характеристики каолинитовой глины и ямальских грунтов, включая влажность, предел текучести, пластичность и плотность. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица .1. Физико-механические свойства каолинитовой глины и ямальских грунтов

Грунт	Температура, °	Влажность текучести, %	влажность раскатывания, %	Число пластичности, %	Плотность грунта, г/см³	Плотность скелета, г/см³
Суглинок	-5	34,91	25,46	9,45	1,82	1,3
Супесь	-5	36,42	30,3	6,12	1,73	1,2
Каолиновая глина	-5	50,00	31,0	19,0	1,65	1,1

Для каолинитовой глины для испытаний использовались 6 идентичных, приготовленных одинаковым способом образцов, для ямальских грунтов – по одному.

Результаты исследований

С использованием экспериментального комплекса были получены значения абсолютных деформаций, времени и напряжения. Кривые ползучести строились на основе данных, зафиксированных при постоянных уровнях напряжения (нагрузки) в течение продолжительного периода, от 8 до 20 суток.

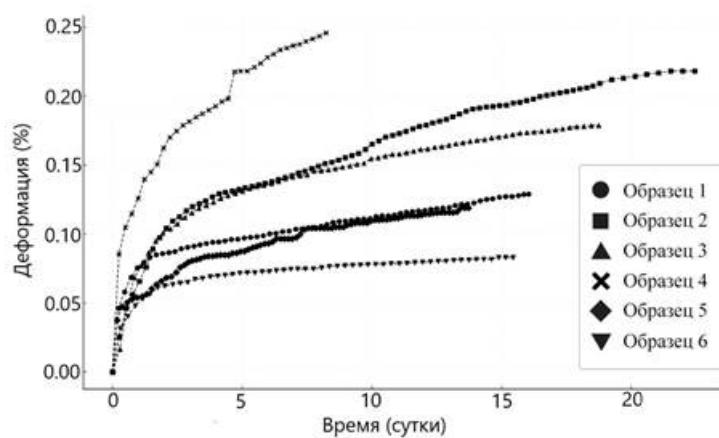


Рис.3. Кривые ползучести мерзлой каолинитовой глины, цифрами обозначены номера образцов, нагрузка 0,148 МПа

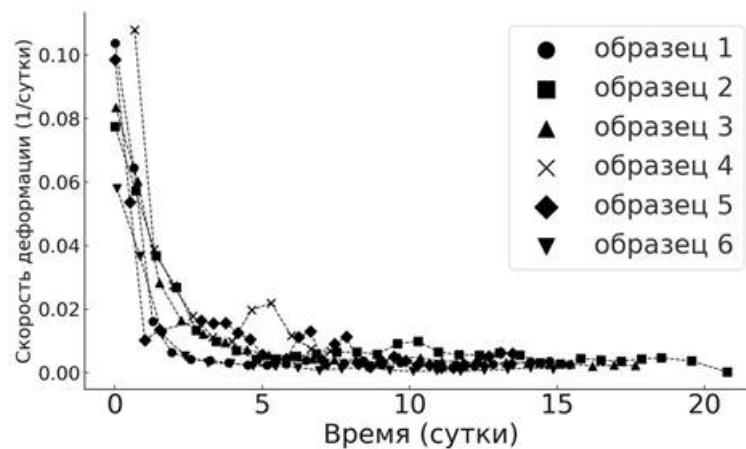


Рис.4. Реологические кривые мерзлой каолинитовой глины, цифрами обозначены номера образцов, нагрузка 0,148 МПа

На рисунке 3 представлены результаты длительных испытаний 6-ти образцов мерзлой каолинитовой глины в условиях постоянной нагрузки. Кривые ползучести демонстрируют классическое поведение, включающее две стадии: начальную, с уменьшающейся скоростью, и стабильную стадии. При этом в работе [22] наблюдались три стадии ползучести мерзлой каолинитовой глины, после достижения минимальной скорости ползучести происходило ее увеличение и разрушение образцов.

На начальном этапе нагружения у всех образцов наблюдается резкий рост деформации, что характерно для начальной стадии ползучести (или упруго-вязкого деформирования). После этого скорость деформации снижается, и процесс переходит в стадию стабильной (вторичной) ползучести. Среди всех образцов образец 4 проявил наибольшую склонность к деформированию, достигнув максимальной суммарной деформации к концу испытания. В то же время образец 6 продемонстрировал минимальные деформации, что указывает на его большую структурную устойчивость при длительном нагружении.

На рисунке 4 показаны соответствующие реологические кривые. В первые сутки скорость деформации достигает максимальных значений, после чего происходит резкое ее падение. С 5 суток и далее все образцы демонстрируют стабилизацию скорости деформации на низком уровне, что соответствует развитию второй стадии ползучести. Незначительные колебания скорости деформации, особенно заметные у образца 4, вероятно, связаны с локальными микро-разрушениями в структуре глины в процессе

ползучести.

Таким образом, результаты испытаний подтверждают наличие выраженных стадий ползучести в мерзлой каолиновой глине и указывают на влияние внутренней структуры образцов на характер их деформационного поведения при длительном нагружении.

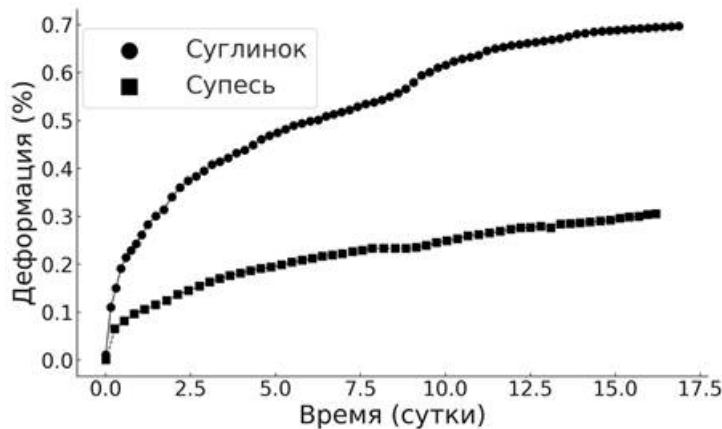


Рис.5. Кривые ползучести мерзлой аллювиальных супеси и суглинка, нагрузка 0,148 МПа

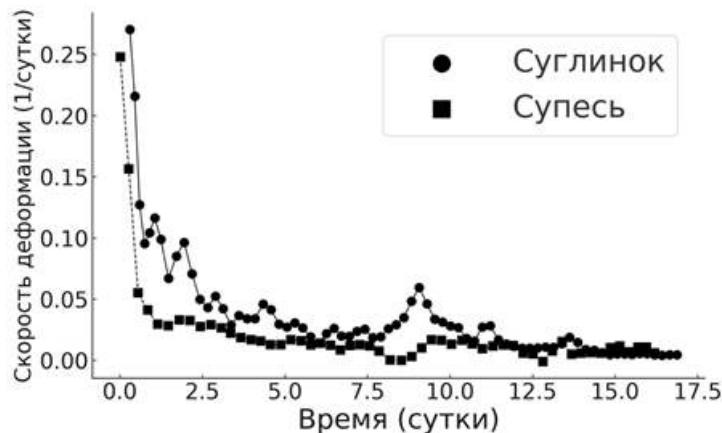


Рис.6. Реологические кривые мерзлых аллювиальных супеси и суглинка

На рисунках 5 и 6 представлены кривые ползучести и реологические кривые мерзлых грунтов различного гранулометрического состава — супеси и суглинка — в условиях одноосного нагружения при постоянной нагрузке 0,148 МПа

Анализ кривых ползучести (рис.5) показывает, что на начальной стадии испытаний для обоих типов грунтов наблюдается резкий рост деформации, что обусловлено перераспределением внутренних напряжений и уплотнением пористой структуры. Однако величина деформации суглинка значительно превышает аналогичные показатели супеси на всём протяжении испытания. Это свидетельствует о большей склонности суглинка к длительным деформациям ползучести в мерзлом состоянии.

На рисунке 6 четко выделяются две стадии ползучести: начальная (первичная) и вторичная. В первые сутки испытаний скорость деформации резко снижается, что указывает на завершение стадии начальной стадии ползучести. В дальнейшем скорость стабилизируется на низких уровнях и практически не изменяется на протяжении всего срока наблюдения, что характерно для стадии стабильной (вторичной) ползучести. При этом максимальные значения скорости деформации на начальном этапе, а также последующие стационарные скорости у аллювиального суглинка выше, чем у супеси, что подчёркивает различие в их реологических характеристиках.

Полученные результаты указывают на то, что физико-механические свойства мерзлых грунтов существенно зависят от их гранулометрического состава: повышение содержания мелкодисперсных частиц в суглинках способствует развитию более интенсивной ползучести при отрицательных температурах.

Модели длительной ползучести

Широко известным уравнением, описывающим ползучесть мерзлых грунтов, является уравнение, полученное С. С. Вяловым на основе технической теории упрочнения [2]:

$$\varepsilon = (\sigma/\xi)^{1/m} t^\beta \quad (1)$$

где ε – относительная деформация образца, σ – напряжение, t – время, β , m и ξ – эмпирические параметры: β – коэффициент нелинейности деформирования по времени, m – коэффициент нелинейности деформирования по напряжению (коэффициент упрочнения), ξ параметр, близкий по смыслу к модулю деформации. Параметр β учитывает рост деформаций во времени. Возрастание коэффициента упрочнения m связано с уменьшением нагрузки, необходимой для одной и той же деформации грунта

Степенная формула может быть задана с различным числом параметров и с различными исходными допущениями. Степенная формула с допущением, что мгновенная деформация равна нулю, имеет вид [3]:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{A_H}\right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{t^\beta}{T}\right) \quad (2)$$

Где ε – относительная деформация образца, σ – напряжение, t – время, A_H , m , T , β – опытные параметры

Модель ползучести Бюргерса состоит из тел Максвелла и Кельвина, соединенных последовательно. Элементы модели и уравнение ползучести представлены на рис. 7 и уравнении (3) [23, 24, 16]

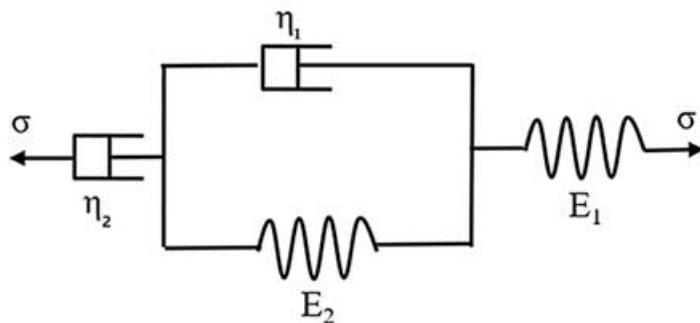


Рис.7.Оригинальная модель элемента Burgers.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left[1 - e^{-\left(\frac{E_2 t}{\eta_2} \right)} \right] + \frac{\sigma}{\eta_1} t \quad (3)$$

Где, \square и \square – напряжение и деформация в модели Бюргерса; t – время, \square_1 и E_1 – коэффициент вязкости и модуль упругости в модели Максвелла; \square_2 и E_2 – коэффициент вязкости и модуль упругости в модели Кельвина.

Для описания длительной деформации мерзлых грунтов под постоянной нагрузкой часто

используется модель ползучести Нисихары (Nishihara model), предложенная в [13, 15, 14]. Элементы модели и уравнение ползучести представлены на рис.8 и уравнении (4)

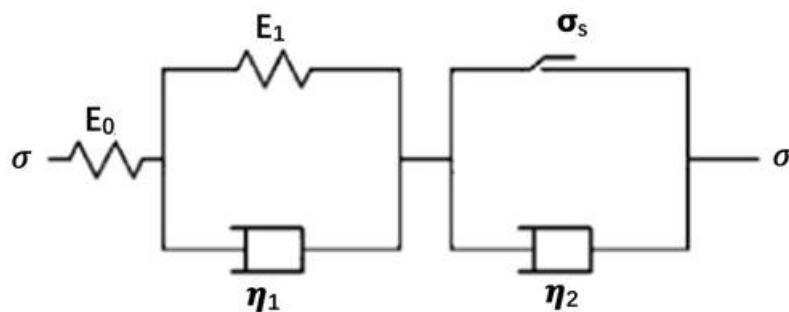


Рис.8. Классическая модель Нисихары

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\left(\frac{E_1}{\eta_1} t\right)}\right) & \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - e^{-\left(\frac{E_1}{\eta_1} t\right)}\right) + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta_2} t & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (4)$$

где \square и \square - напряжение и деформация; t -время, E_0 - модуль мгновенной упругости, E_1 -модуль упругости замедленной деформации, η_1 -коэффициент вязкости элемента Кельвина, η_2 -коэффициент вязкости пластического течения, а σ_s -предел текучести материала.

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 для различных грунтов

Модель	Параметр	Каолиновая глина	Супесь	Суглинок
Упрочнения	β	0,29	0,38	0,36
	ξ , кг/см ² *сут	9,41	9,40	9,30
	m	0,58	0,60	0,70
Степенная	A_H , МПа	1,62	0,96	0,25
	m	0,36	0,26	0,09
	T, сутки	4,20	0,39	1.00
	β	0,29	0,38	0,36
Бюргерса	E_1 , МПа	225,17	370,15	144,34
	E_2 , МПа	185,07	120,62	48,26
	η_1 , МПа•сутки	6689,81	1655,09	670,14
	η_2 , МПа•сутки	1000	239,58	93, 17
Нисихары	E_0 , МПа	215,95	226,91	93,11
	E_1 , МПа	115,88	57,19	25,49
	η_1 , МПа•сутки	1000	416,67	165,74

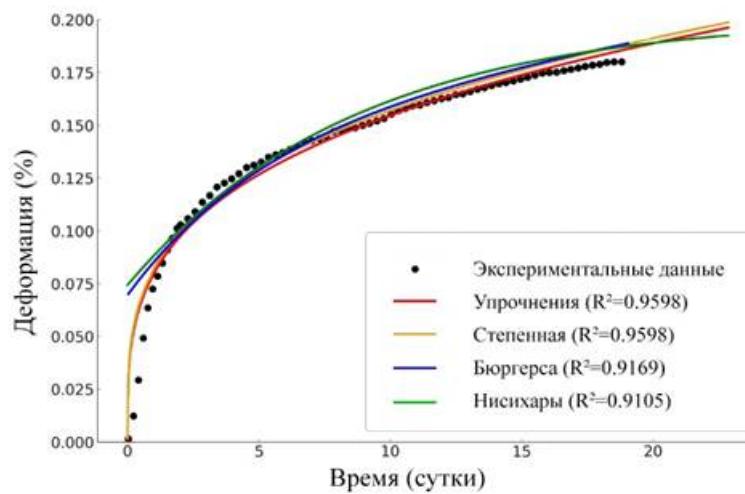


Рис. 9. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести для мерзлой каолинитовой глины

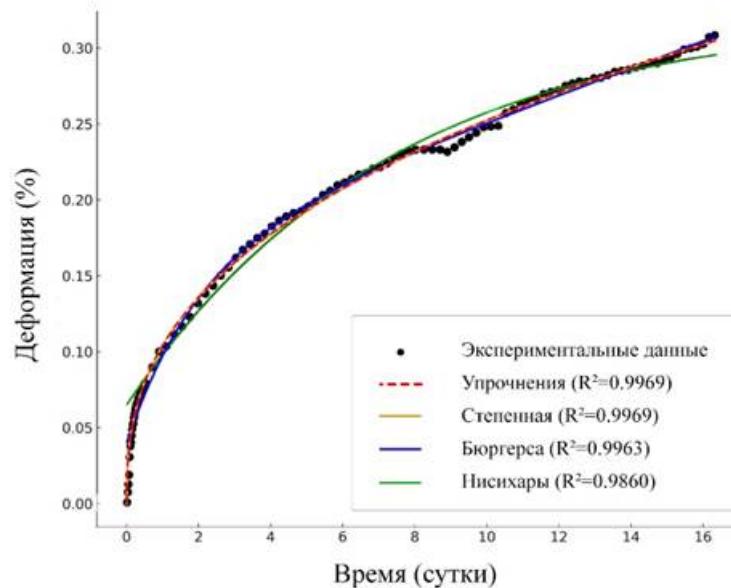


Рис. 10. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести для мерзлой аллювиальной супеси

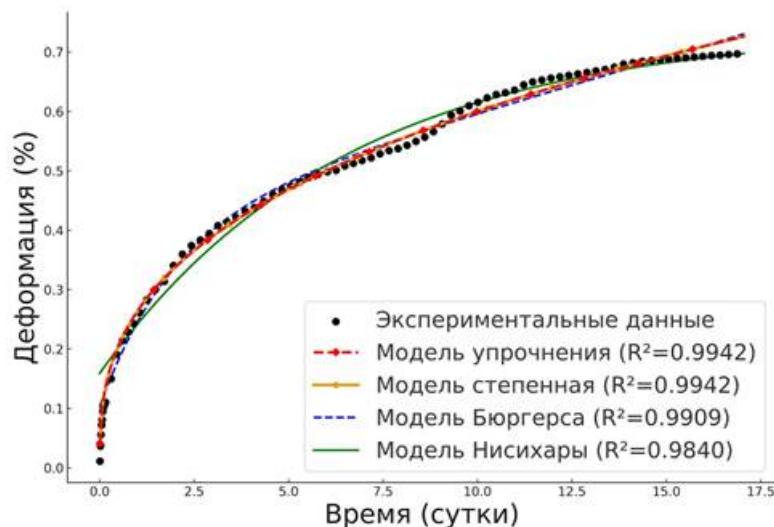


Рис. 11. Сравнение экспериментальных данных и расчетных кривых ползучести для

мерзлого аллювиального суглинка

Проведено сравнительное моделирование ползучести трёх типов мерзлых грунтов: каолинитовой глины и аллювиальных супеси и суглинка. Аппроксимация экспериментальных данных выполнена с использованием моделей упрочнения, степенной модели, моделей Бюргерса и Нисихары.

Каолиновая глина отличается наименьшими деформациями благодаря плотной структуре и высокой связности частиц. Наилучшее соответствие экспериментальным данным (рис. 9) показали модели упрочнения и степенная модель ($R^2 = 0,9598$), тогда как модель Бюргерса недооценивала деформации на поздних стадиях, а модель Нисихары имела наибольшие расхождения.

Мерзлая супесь характеризуется равномерным накоплением деформаций, что обусловлено её меньшей связностью и большей проницаемостью. Модели упрочнения и степенная модель (рис. 10) обеспечили максимальную точность аппроксимации ($R^2 = 0,9969$), модель Бюргерса показала близкие результаты ($R^2 = 0,9963$), тогда как модель Нисихары уступала им ($R^2 = 0,9860$).

Ползучесть суглинка отличается быстрым накоплением деформаций на начальной стадии и последующей стабилизацией (рис. 11). Модели упрочнения и степенная модель вновь продемонстрировали наилучшие результаты ($R^2 = 0,9942$), модель Бюргерса показала близкие результаты ($R^2 = 0,9909$). Модель Нисихары показала наименьшую точность ($R^2 = 0,9840$) из-за ограничений в описании нелинейной эволюции вязкости мерзлых грунтов.

Обсуждение результатов

Результаты настоящего исследования показали, что поведение мерзлых грунтов при длительном одноосном нагружении существенно зависит от их гранулометрического состава и структурных характеристик. Каолиновая глина, обладающая высокой связностью и плотной структурой, проявила наименьшие деформации ползучести, тогда как суглинок продемонстрировал наибольшую склонность к развитию длительных деформаций. Супесь заняла промежуточное положение между ними. Анализ кривых деформирования и скорости деформации подтвердил наличие классических стадий ползучести – первичной и вторичной – у всех исследованных типов грунтов. Существенные различия наблюдались на начальных стадиях, где степень мгновенной деформации и последующее замедление скорости варьировались в зависимости от типа грунта. Аналогичные закономерности были отмечены в работе [7, 22, 5].

Результаты моделирования указывают на высокую универсальность моделей упрочнения и степенной модели при описании процессов ползучести различных типов мерзлых грунтов. Эти модели успешно учитывают как начальный ускоренный этап накопления деформаций, так и последующую стабилизацию скорости ползучести. Модель Бюргерса применима для приближенного описания поведения грунтов на начальных и промежуточных стадиях, однако менее эффективна на поздних стадиях, поэтому необходимо введение механизма повреждения [16]. Классическая модель Нисихары (Nishihara model) удовлетворительно описывает поведение мерзлого грунта на начальной и стабильной стадиях ползучести. Однако при высоких уровнях напряжений или в условиях длительного нагружения она не позволяет адекватно воспроизвести стадию ускоренной ползучести, характеризующуюся ростом деформаций вплоть до разрушения образца. В связи с этим для применения модели в задачах, связанных с

длительной ползучестью мерзлых грунтов, требуется её дополнительная модификация и совершенствование [15, 14]

Вместе с тем необходимо отметить определённые ограничения проведённого исследования. Во-первых, лабораторные испытания были выполнены в контролируемых условиях постоянной температуры и нагрузки, что лишь приближенно отражает реальные полевые условия, где температура, влажность и нагрузка могут изменяться во времени. Во-вторых, длительность испытаний (8–20 суток), хотя и превышает время большинства проведенных ранее испытаний, ограничивает возможность прямого экстраполирования результатов на существенно большие временные масштабы, характерные для реальных объектов в криолитозоне. Кроме того, использованные образцы имели относительно небольшие размеры, что потенциально усиливает влияние краевых эффектов и неоднородностей структуры грунта. В будущем представляется целесообразным расширить экспериментальные исследования на более широкий диапазон температур и влажности.

Выводы

1. В настоящем исследовании был успешно применён экспериментальный комплекс «ИВК-Механика-Теплофизика» с силовым блоком БОН.1.600.3, обеспечивающим высокую точность изменения деформации $\pm 0.01\text{мм}$. Это позволило получить надежные данные о деформационном поведении мерзлых грунтов в условиях одноосного нагружения при отрицательных температурах.

2. Экспериментальные данные, полученные в ходе длительных испытаний мерзлых глинистых грунтов, продемонстрировали классические стадии ползучести: начальную с уменьшением скорости деформаций и последующую вторичную стадию с стабильной скоростью деформации. Механическое поведение мерзлых грунтов оказалось тесно связано с их гранулометрическим составом: увеличение содержания мелкодисперсных фракций в ямальских грунтах способствует ускорению ползучести при отрицательных температурах.

3. Модели упрочнения и степенная модель обеспечивают хорошую точность при описании ползучести мерзлых глинистых грунтов, что делает их предпочтительными для инженерного и научного моделирования; модель Бюргерса применима с ограничениями, модель Нисихары требует корректировки для долгосрочных прогнозов.

4. В будущем рекомендуется проведение дополнительных исследований, включая испытания при переменных температурно-нагрузочных условиях, расширение диапазона времени, исследуемых температур и влажностей, а также развитие реологических моделей с учётом фазовых переходов и структурных изменений в мерзлых грунтах.

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. Вялов С. С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
3. Роман Л. Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК "НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА", 2002. 427 с.
4. Брушков А. В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 330 с.
5. Тао Д., Брушков А. В., Алексеев А. Г. Длительная ползучесть мерзлых грунтов в

- многолетних испытаниях // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. С. 1-14.
6. 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.
7. 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.
8. Zhang H., Zhang J., Zhang Z., Chen J., You Y. A consolidation model for estimating the settlement of warm permafrost // Computers and Geotechnics. 2016. Vol. 76. Pp. 43-50.
9. Liu S. W., Zhang J. M., Zhang H., Zheng B. Experimental study on long-term creep deformation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2012. № 31. Pp. 2781-2786. (In Chinese)
10. Роман Л. Т., Котов П. И., Царапов М. Н. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 6. С. 35-41.
11. Li K.-Q., Yin Z.-Y., Qi J.-L., Liu Y. State-of-the-art constitutive modelling of frozen soils // Archives of Computational Methods in Engineering. 2024. Vol. 31. Pp. 3801-3842.
12. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
13. Nishihara K., Sasajima S. Constitutive Equation for Creep of Rocks // Proceedings of the 3rd Japan National Symposium on Rock Mechanics. Japanese National Committee for Rock Mechanics, 1961. Pp. 41-47.
14. He F., Lei W., Mao E., Liu Q., Chen H., Wang X. Creep constitutive modeling of the shear strength of the permafrost-concrete interface considering the stress level at -1°C // PLoS ONE. 2024. 19(4): e0297824.
15. Shao Y., Suo Y., Xiao J., Bai Y., Yang T. Creep Characteristic Test and Creep Model of Frozen Soil // Sustainability. 2023. 15(5): 3984.
16. Yao Y., Cheng H., Lin J., Ji J. Optimization of Burgers creep damage model of frozen silty clay based on fuzzy random particle swarm algorithm // Scientific Reports. 2021. 11(1): 18974.
17. Chen Z., Lin B., Hou H. Creep behavior of frozen soil and creep analytical model of frozen wall // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. 11193.
18. Царапов М. Н. Методика анализа кривых ползучести мерзлых и оттаивающих грунтов на основе метода кусочно-линейной аппроксимации // Успехи современного естествознания. 2024. Т. 1. № 1. С. 84-92.
19. Arenson L. U., Springman S. M. Mathematical descriptions for the behavior of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0°C // Canadian Geotechnical Journal. 2005. Vol. 42. № 2. Pp. 431-442.
20. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 109 с.
21. Chen Y., Lin B. Study on uniaxial mechanical properties and creep model of frozen clay // Cryogenics. 2021. № 4. Pp. 70-75. (In Chinese)
22. Волохов С. С. О природе механокалорического эффекта в мерзлых грунтах при одноосном сжатии // Криосфера Земли. 2018. 22(1): 14-19. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(14-19).
23. Burgers J. M. First Report on Viscosity and Plasticity // Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Verhandelingen. 1935. Series 1. Vol. 15. No. 3. Pp. 1-53.
24. Li D., Yang X., Chen J. A study of Triaxial creep test and yield criterion of artificial frozen soil under unloading stress paths // Cold Reg. Sci. Technol. 2017. Vol. 141. Pp. 163-170.

Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом изучения является исследование ползучести мерзлых грунтов с применением различных моделей деформирования.

Тема исследований актуальна. Климатические изменения сопровождаются деградацией мерзлых грунтов, что ставит под угрозу устойчивость зданий и сооружений в криолитозоне. Мерзлые грунты, особенно засоленные, проявляют выраженную ползучесть, которая состоит из начальной стадии деформирования с уменьшающейся скоростью и стабильной стадии, а также незатухающую (прогрессирующую) ползучесть. Что и определяет актуальность исследований в данном направлении. При инженерных изысканиях деформационные характеристики мерзлых грунтов определяются преимущественно методом лабораторных механических испытаний. Основной целью настоящего исследования является изучение длительной ползучести мерзлых грунтов методом одноосного сжатия и определение конститутивной модели мерзлых грунтов, которая имеет важное значение для точного описания и прогнозирования их механического поведения, способного обеспечить теоретические рекомендации по вопросам безопасности и устойчивости инженерных проектов в условиях холодного региона.

Методология исследования основана на применении лабораторных методов определения деформационных характеристик мерзлых грунтов по ГОСТ 12248-2020 (метод одноосного сжатия). В данной работе ползучесть мерзлых грунтов изучалась методом одноосного сжатия с использованием экспериментального комплекса «ИВК Механика-теплофизика» (правообладатель-лаборатория геоинновационных технологий МГУ). Основным устройством экспериментального комплекса являлся силовой блок осевого нагружения БОН.1.600.3, предназначенный для проведения компрессионных и одноосных испытаний (обеспечивает температурный диапазон от -15°C до $+35^{\circ}\text{C}$, нагрузку от 0,15 до 4,5 кН). Он позволяет тестировать образцы размерами от 50×100 мм до 70×140 мм (погрешность измерения перемещений: ± 0.01 мм). Устройство применяется для передачи механического воздействия на образцы и регистрации их прочностных и деформационных параметров. Перед испытаниями образцы насыщались влагой, охлаждались и замораживались при заданной температуре ($-5,0^{\circ}\text{C}$). Далее они помещались в одометр и подвергались ступенчатому одноосному нагружению с шагом 0,5 кН. На каждом этапе регистрировались кривые «напряжение–время», «деформация–время» и «деформация–напряжение», позволяющие построить реологические зависимости. Максимальное время испытаний составляло около 20 суток.

Научная новизна исследований в статье заключается в использовании оригинального новейшего экспериментального комплекса «ИВК Механика-теплофизика» для исследования ползучести мерзлых грунтов с применением различных моделей деформирования.

Стиль статьи – научный. Авторами в статье представлен собственный оригинальный материал исследования, обогащенный достаточным количеством расчетных данных, табличным материалом, иллюстрирован схемами и доступным графическим материалом. Объем статьи выдержан. Структура статьи соответствует требованиям журнала «Арктика и Антарктика».

Автором показано, что на начальном этапе нагружения у всех образцов наблюдается резкий рост деформации, что характерно для начальной стадии ползучести (или упруго-вязкого деформирования). После этого скорость деформации снижается, и процесс

переходит в стадию стабильной (вторичной) ползучести. Среди всех образцов образец 4 проявил наибольшую склонность к деформированию, достигнув максимальной суммарной деформации к концу испытания. В то же время образец 6 продемонстрировал минимальные деформации, что указывает на его большую структурную устойчивость при длительном нагружении. Таким образом, результаты испытаний подтверждают наличие выраженных стадий ползучести в мерзлой каолиновой глине и указывают на влияние внутренней структуры образцов на характер их деформационного поведения при длительном нагружении. Полученные результаты указывают на то, что физико-механические свойства мерзлых грунтов существенно зависят от их гранулометрического состава: повышение содержания мелкодисперсных частиц в суглинках способствует развитию более интенсивной ползучести при отрицательных температурах.

Библиография статьи включает в себя 24 литературных источника, в том числе 12 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам состоит в ссылках на литературные источники.

В качестве замечания хочется отметить, что желательно ссылку на применяемый ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» оставить в тексте, исключив ее из основного библиографического списка.

Выводы в статье обоснованы и отражают результаты проведенных исследований. Автором установлено, что модели упрочнения и степенная модель обеспечивают хорошую точность при описании ползучести мерзлых глинистых грунтов, что делает их предпочтительными для инженерного и научного моделирования; модель Бюргерса применима с ограничениями, модель Нисихары требует корректировки для долгосрочных прогнозов. В настоящем исследовании был успешно применён экспериментальный комплекс «ИВК-Механика-Теплофизика» с силовым блоком БОН.1.600.3, обеспечивающим высокую точность изменения деформации ± 0.01 мм. Это позволило получить надежные данные о деформационном поведении мерзлых грунтов в условиях одноосного нагружения при отрицательных температурах.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых в области мерзлотоведения и грунтоведения, рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний по статье не отмечено, по тексту имеются опечатки, которые необходимо исправить.