

## ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 624.131.4

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗА ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

© 2022 г. Ф. С. Карпенко<sup>1,\*</sup>, В. Н. Кутергин<sup>1</sup>, Е. О. Дернова<sup>1</sup>, А. А. Осокин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

\*E-mail: kafs08@bk.ru

Поступила в редакцию 14.01.2022 г.

После доработки 17.01.2022 г.

Принята к публикации 22.01.2022 г.

Мерзлые грунты традиционно рассматриваются как стабильные образования, изменение строения и свойств которых может происходить только при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. Однако результаты проведенных в последнее время научных и практических исследований показывают, что эти изменения начинаются уже в мерзлом состоянии и носят латентный характер, что подтверждается современной активизацией экзогенных геологических процессов в криолитозоне под влиянием климатических изменений, происходящих в настоящее время. Постепенное повышение температуры грунтов криолитозоны приводит к изменению ее состояния и строения. Считается, что газовая составляющая не оказывает значительного влияния на свойства грунтов при условии сохранения их мерзлого фазового состояния. В статье показано, что миграция газов в мерзлых грунтах начинается уже в условиях повышенных отрицательных температур. Интенсивность этого процесса оказывает существенное влияние на динамику изменения прочностных свойств мерзлых грунтов при нарушении условий их естественного залегаания в результате температурного воздействия и действия нагрузок. Указано на необходимость разработки и практического применения новых методик определения прочностных свойств мерзлых пород с использованием прямых методов исследований, таких как трехосные и сдвиговые испытания, результаты которых должны служить основой при проектировании и строительстве новых инженерных сооружений, а также адаптации действующих конструкций в регионах распространения многолетнемерзлых пород.

**Ключевые слова:** криолитозона, мерзлые грунты, газовые включения, газовыделение, исследование свойств мерзлых грунтов методом трехосного сжатия и одноплоскостного среза

DOI: 10.31857/S0869780922020047

#### ВВЕДЕНИЕ

Мерзлые грунты занимают важное место при хозяйственном освоении геологической среды. Они широко распространены на территории России и часто являются грунтами оснований фундаментов сооружений. Все это определяет высокие требования к качеству исследований мерзлых грунтов, результаты которых должны давать не только полную объективную характеристику их свойств, но и прогноз их возможных изменений в результате действий различных факторов. В настоящее время инженерно-геологические исследования мерзлых грунтов не всегда могут дать такую оценку, и в первую очередь это касается изменения свойств мерзлых грунтов в результате температурного воздействия. Происходящее в настоящее время изменение климата, которое вызывает постепенное повышение температуры грунтов криолитозоны, приводящее к закономерному изменению ее состояния и строения, наглядно подтверждает это положение. В результате

этих явлений происходит активизация разнообразных экзогенных геологических процессов, влияющих на безопасность инженерных сооружений в криолитозоне, многие из которых могут иметь негативные, а в ряде случаев и катастрофические последствия, такие как газовые выбросы, воронки взрывов, просадки, деформации фундаментов, береговая, овражная эрозия, склоновые явления, и другие процессы. Характерной современной особенностью этих процессов является то, что их протекание и активизация происходят даже в условиях сохранения мерзлого фазового состояния грунтов, а природа их развития остается до конца не определенной.

Все эти явления требуют ответной реакции, активного вмешательства в их протекание, проведения специальных защитных мероприятий. Такое реагирование на уже произошедшие изменения состояния мерзлых грунтов не может быть эффективным, и не может предвосхитить негативные явления, которые будут протекать в мерз-

лых грунтах при дальнейшем изменении геокриологических условий.

Решить эти проблемы можно на основе изменения подхода к проектированию и строительству новых и адаптации действующих инженерных сооружений к меняющимся свойствам мерзлых грунтов в результате изменения строения криолитозоны. Этот подход должен быть основан на изучении реакции мерзлых грунтов на изменения криологических условий, позволяющим дать полный объективный прогноз изменения их свойств при разных сценариях температурных изменений.

Для проведения таких исследований требуется разработка нового специального методического подхода к инженерно-геологическому изучению мерзлых грунтов. Основные необходимые, на взгляд авторов, принципы такого подхода, связанные с проведением грунтоведческих исследований, определением строения и свойств мерзлых грунтов, изложены в настоящей работе. В основу такого подхода должен быть положен анализ действующих нормативных документов, определяющих направления и требования к изучению строения и свойств мерзлых грунтов, и новых научных и методических разработок, касающихся этих вопросов.

#### ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ПРОВЕДЕНИЮ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Общие требования к инженерно-геологическим исследованиям мерзлых грунтов и проведению на их основе расчетам оснований и фундаментов инженерных сооружений определяются положениями основных нормативных документов – сводов правил (СП)<sup>1</sup>.

Свод правил СП 47.13330 и разработанный в развитие его положений СП 446.132580 определяют общие требования к проведению основных видов работ и комплексных исследований и требования к инженерно-геологическим изыскани-

ям для подготовки проектной документации на отдельных этапах разных видов инженерных изысканий. Специальный раздел данного документа посвящен условиям проведения инженерно-геокриологических исследований.

В целом, Свод правил СП 446.132580 устанавливает требования к проведению инженерно-геологических изысканий, которые должны давать не только комплексную характеристику инженерно-геологических условий территории изысканий, но и прогноз их возможных изменений, развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов, изменений геокриологических условий и проявлений криогенных процессов и других явлений под влиянием природных факторов и техногенных воздействий. Результаты инженерно-геологических изысканий должны обеспечивать получение необходимых и достаточных материалов для обоснования и планирования градостроительной деятельности и разработки проектных решений. Для получения характеристик свойств грунтов, отвечающих вышперечисленным требованиям, положениями СП допускается выполнение лабораторных исследований, позволяющих решить эту задачу, виды которых тем не менее не регламентированы этим и другими нормативными документами.

Свод правил СП 22.13330 определяет общие правила разработки проектных решений, в соответствии с которыми при проектировании оснований и фундаментов должны быть предусмотрены решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации сооружений. Важнейшим положением данного СП является то, что проектирование оснований и фундаментов проводится для всех классов грунтов по двум группам предельных состояний.

Первая группа – это несущая способность грунтов. Несущая способность грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к потере устойчивости, вплоть до разрушения, фундаментов и оснований сооружений и их полной непригодности к эксплуатации. Определение несущей способности грунтов проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств.

Вторая группа предельных состояний – деформируемость грунтов. Деформируемость грунта определяет предельное напряженное состояние, превышение которого приводит к развитию недопустимых деформаций фундаментов и оснований сооружений, затрудняющих их нормальное функционирование (осадок, подъемов, прогибов, трещин и т.п.). Определение деформируемости грунтов также проводится расчетным путем на основе результатов определения их свойств.

<sup>1</sup> СП 446.132580.2019 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. М.: Стандартинформ, 2019. 78 с. СП 47.13330. 2016 Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М.: Стандартинформ, 2017. 90 с. СП 22.13330.2016 Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. М.: Стандартинформ, 2016. 225 с. СП 11-105-97 Свод правил. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV. Правила производства работ в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. 61 с. СП 25.13330.2012 Свод правил. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. М.: Стандартинформ, 2021. 110 с.

Основными параметрами механических свойств грунтов, определяющими несущую способность оснований и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $C$ , предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов  $R_c$ , модуль деформации  $E$  и коэффициент поперечной деформации  $\nu$  грунтов, а также другие характеристики грунтов, определяемые по отдельным программам для нестандартных, в том числе, нелинейных методов расчета оснований).

Строительство и эксплуатация инженерных объектов и сооружений на территориях развития мерзлых грунтов имеет дополнительную специфику. Многолетнемерзлые грунты традиционно рассматриваются как относительно стабильные образования, сложенные в основном минеральными частицами, дополнительно сцементированными льдом при замерзании. Общепринято считать, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. Такой подход определяет направления исследований свойств мерзлых грунтов при инженерно-геологических изысканиях — испытания проводятся в условиях сохранения естественной температуры и при оттаивании. Эти данные используются для проектных расчетов несущей способности и других свойств грунтов оснований сооружений.

В соответствии с требованиями нормативных документов СП 11-105-97 и СП 25.13330 исследования должны проводиться на основе применения одного из двух принципов: (1) в условиях сохранения естественной температуры грунтов и их мерзлого состояния и (2) в оттаянном или оттаивающем состоянии. При этом считается, что изменение свойств мерзлых грунтов происходит при переходе из мерзлого фазового состояния в талое. В интервалах температур ниже температур замерзания—оттаивания свойства мерзлых грунтов считаются практически неизменными. Это положение не всегда может описать реальное поведение мерзлых грунтов. Изменение их свойств в условиях высоких отрицательных температур носит постепенный характер при том, что в целом сами грунты остаются в мерзлом фазовом состоянии. Причем интенсивность изменения свойств грунтов зависит не только от температурного режима, но и от величины нагрузок, действующих на них.

Определение состава, строения и свойств грунтов является важной частью инженерно-геологических изысканий, и требования к проведению их лабораторных исследований содержат все нормативные документы, регламентирующие проведение инженерно-геологических изысканий и проектных расчетов, в том числе в районах

залегания многолетнемерзлых грунтов. Проведение лабораторных испытаний мерзлых грунтов регламентируются нормативами ГОСТ и включает определение их гранулометрического состава, физических, физико-химических и механических свойств. Приборно-методологическая база исследования механических свойств мерзлых грунтов имеет существенные отличия от немерзлых грунтов других классов. В соответствии с требованиями ГОСТ 12248.7-11<sup>2</sup> и СП 25.13330 для расчетов оснований и фундаментов в мерзлых и оттаивающих грунтах по обеим группам предельных состояний применяются, в первую очередь, результаты изучения отдельных их физических и теплофизических свойств. Показатели механических свойств грунтов, прочности и деформируемости определяются расчетным путем по результатам компрессионных испытаний, испытаний шариковым штампом и сдвига по поверхности смерзания с применением различных коэффициентов, учитывающих изменения температурного режима и теплофизических свойств грунтов.

В 2021 г. был введен в действие новый нормативный документ ГОСТ 59597<sup>3</sup>, регламентирующий испытания мерзлых грунтов методом трехосного сжатия. Этот норматив определяет проведение испытаний мерзлых грунтов в приборах трехосного сжатия (стабилометрах) в различных условиях температурного режима и напряженного состояния для определения показателей их прочности и деформируемости.

Метод трехосного сжатия — прямой метод определения механических свойств грунтов, один из наиболее достоверных, позволяющий получить наиболее полную и объективную характеристику их свойств. Несмотря на свои преимущества, до настоящего времени в практических исследованиях мерзлых грунтов он так и не получил широкого применения. Наиболее широко в практике инженерно-геологических исследований мерзлых грунтов применяются расчетные методы определения их механических свойств. Такие ис-

<sup>2</sup> ГОСТ 12248.7—2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с. ГОСТ 12248.8—2020 Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. М.: Стандартинформ, 2020. 15 с. ГОСТ 12248.9—2020 Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 22 с. ГОСТ 12248.10—2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с. ГОСТ 12248.11—2020 Грунты. Определение характеристик прочности оттаивающих грунтов методом среза. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

<sup>3</sup> ГОСТ 59597—2021 Грунты. Метод трехосного сжатия мерзлых грунтов. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 15 с.

следования и основанные на них мониторинговые наблюдения позволяют получить достоверные данные о тепловом и теплофизическом режиме сооружений. При этом полная и объективная характеристика механических свойств грунтов оснований по результатам таких испытаний получена быть не может. Соответственно, достоверность инженерных расчетов в этом случае также снижается и, в целом, такой подход не всегда позволяет дать полную характеристику свойств мерзлых грунтов и достоверно обосновать прогноз их изменения при строительстве и эксплуатации сооружений.

Для решения возникающих вопросов, повышения достоверности и обоснованности определения механических свойств мерзлых грунтов и прогноза их изменения в меняющихся геокриологических условиях и при действии техногенных нагрузок, необходимо изменение методов исследований. Для исследования мерзлых грунтов требуется разработка новых методик лабораторных испытаний, применение которых позволит получить наиболее полную и объективную характеристику их свойств. В основу таких методик должны быть положены испытания методом трехосного сжатия. Наряду с трехосными испытаниями, исследование мерзлых грунтов может проводиться методом одноплоскостного среза, проводимого подобно трехосным испытаниям в различных температурных условиях. Методика испытаний грунтов на срез, описанная ранее [3, 4], была разработана в ИГЭ РАН и принята в качестве стандарта организации<sup>4</sup>.

### ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Основной причиной проблемных вопросов, возникающих при исследованиях мерзлых грунтов, является то, что они имеют, в целом, более сложное строение, чем трактуются положениями нормативно-методических документов. Мерзлые грунты представляют собой многокомпонентные системы, в которых кроме минерального скелета могут находиться такие составляющие, как лед, вода в жидком состоянии (незамерзшая вода), растворенные соли и газовые включения, каждая из которых оказывает специфическое влияние на свойства грунтов. Традиционно основное внимание при изучении мерзлых грунтов уделяется минеральной компоненте и воде в различных формах и агрегатном состоянии. Именно они являются основными составляющими мерзлых грунтов, в наибольшей степени определяющими

их свойства. Влияние солей на свойства мерзлых грунтов в настоящее время также достаточно полно изучено. Состав солей, форма их нахождения, количество, все эти факторы изменяют температуру замерзания—оттаивания грунтов и тем самым оказывают существенное влияние на их свойства.

Роль газовой компоненты на строение и свойства мерзлых грунтов в настоящее время изучена в наименьшей степени. Несмотря на то, что газовая составляющая практически повсеместно присутствует в составе мерзлых грунтов, считается, что она не оказывает значительного влияния на их свойства, и детальное изучение газовых включений и их влияния на строение и свойства мерзлых грунтов началось сравнительно недавно [1, 2, 5–8, 10]. Имеющиеся результаты исследований показывают, что именно наличие газовых включений в мерзлых грунтах и их миграция оказывают существенное влияние на изменение их свойств грунтов при нарушении условий естественного залегания в результате температурного воздействия и действия нагрузок при том, что в целом сам грунт остается в мерзлом агрегатном состоянии.

Представления о том, что мерзлые грунты в одинаковых температурных условиях могут обладать различными свойствами, общепризнаны. Для описания этих различий используются понятия твердомерзлый и пластично-мерзлый грунт, закрепленные в нормативных документах<sup>5</sup>, принимаемые как постоянные характеристики состава и строения грунта, которые всегда присущи ему и могут измениться только при оттаивании. В то же время, накопленные в настоящее время данные показывают, что мерзлый грунт может менять свое состояние в результате температурного воздействия, что обусловлено изменением их строения и приводит к изменению свойств. В наибольшей степени это присуще дисперсным мерзлым грунтам, содержащим в своем составе газовые включения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения описанных выше научных и практических положений авторами были проведены опытно-экспериментальные исследования прочностных свойств мерзлых грунтов методом трехосного сжатия и одноплоскостного среза в условиях изменения температурного режима и внешних нагрузок. Методика проведения исследований была подробно описана ранее [9].

Проведенные исследования не только подтверждают возможность изменения строения и свойств мерзлых газосодержащих грунтов, но и

<sup>4</sup> Стандарт организации СТО 93.020–2013/7 Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренированного одноплоскостного среза с замером порового давления [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7\\_section.doc](http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7_section.doc)

<sup>5</sup> ГОСТ 25100–2020 Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.

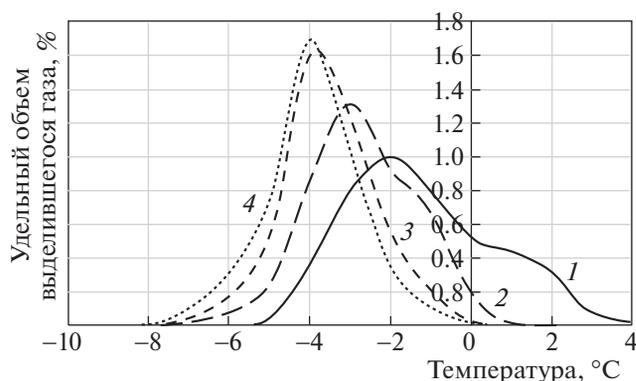
показывают закономерности этих процессов. Исследования проводились для мерзлых дисперсных грунтов, суглинков, супесей и пылеватых песков, наиболее типичных для Арктического региона, для которых характерно содержание газовых включений в количестве от долей процента до 10–15%. Полученные результаты могут быть наглядно продемонстрированы на примере мерзлых суглинков. Грунты исследовались в условиях температур и нагрузок, соответствующих изменяющимся температурным условиям криолитозоны и внешним нагрузкам, возникающим при промышленном и хозяйственном освоении региона.

Исследованные суглинки представлены тугопластичными и полутвердыми разновидностями, суммарная влажность изменяется от 19.0 до 30.3%, плотность – от 1.90 до 2.13 г/см<sup>3</sup>, число пластичности – от 10.7 до 15.5%, показатель текучести – от 0.06 до 0.33 д.е. Характерной особенностью грунтов является неполная водо-(льдо)насыщенность, коэффициент водонасыщения составляет 0.91–0.97, т.е. эти грунты содержат в своем составе газовую компоненту. Температура начала замерзания–оттаивания –1.4°C.

Повышение температуры мерзлых грунтов в области отрицательных значений вызывает выделение содержащегося в них газа. Динамика этого процесса показана на рис. 1. Процесс газовой выделению начинается при температуре грунта –5°C, при повышении температуры продолжается, достигает своего максимума при температуре –2°C, после чего его интенсивность снижается. Температура начала газовой выделению и его пиковой интенсивности зависит от напряженного состояния грунта. Температура начала выделения газа постепенно снижается при увеличении величины объемного сжимающего давления от –7°C при давлении 0.05 МПа до –8°C (при давлении 0.2 МПа). Наибольшая интенсивность газовой выделению при действии нагрузок также наступает при более низких температурах, ниже температуры замерзания–оттаивания грунта: –3°C при давлении 0.05 МПа, –4°C при давлении 0.1 и 0.2 МПа.

Выделение газов в мерзлых грунтах при изменении температуры и напряженного состояния приводит к изменению их строения. В результате газовой выделению при росте температуры под действием сжимающих нагрузок происходит увеличение плотности и степени водо-(льдо)насыщенности и снижение пористости грунтов. Изменение строения грунтов, в свою очередь, вызывает закономерное изменение их прочностных свойств, показанное на рис. 2 (на примере изменения величины угла внутреннего трения).

Изменение прочности мерзлых газосодержащих грунтов под действием температурного фактора происходит закономерно, в соответствии с характером газовой выделению в них. Снижение

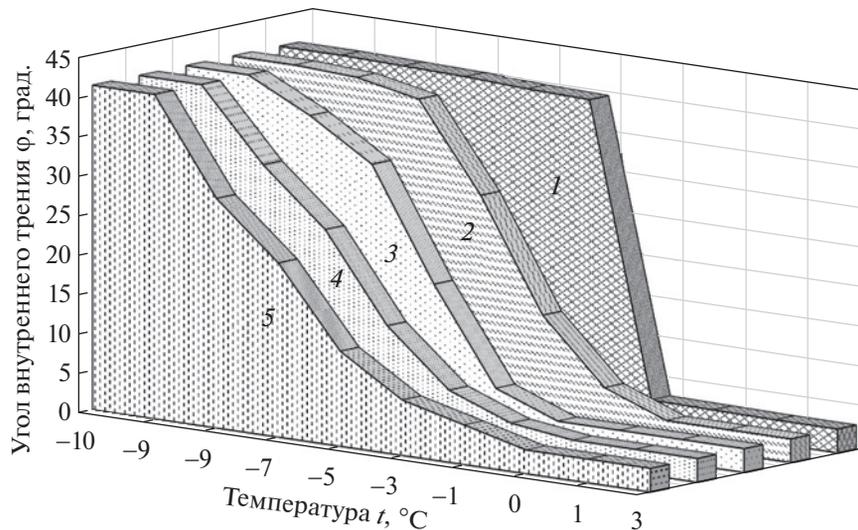


**Рис. 1.** Зависимость удельного объема выделившегося газа от температуры для суглинков при изменении напряженного состояния грунта: 1 – свободное газовой выделению; 2–4 – при объемном давлении: 2 – 0.05 МПа; 3 – 0.1 МПа; 4 – 0.2 МПа.

прочностных свойств начинается и протекает при отрицательных температурах, ниже температуры оттаивания, и интенсивность этого процесса зависит от напряженного состояния грунтов при газовой выделению. При свободном газовой выделению снижение прочности начинается при температуре –5°C, и показатели прочности достигают своих минимальных значений при достижении температуры оттаивания. При газовой выделению под действием нагрузок в 0.05–0.2 МПа прочностные свойства начинают снижаться уже при температурах от –8 до –7°C, наиболее активно продолжают до температур от –5 до –4°C и при повышении температуры до –2°C достигают минимальных значений.

Приведенные данные показывают, что снижение прочности мерзлых газосодержащих грунтов происходит при температурах ниже температуры оттаивания, т.е. в условиях, при которых грунт в целом остается в мерзлом состоянии. Процесс газовой выделению, с одной стороны, служит индикатором снижения прочности грунтов, с другой стороны, интенсивность этого тренда зависит от количества газовых включений в грунтах. Последнее утверждение подтверждается данными экспериментальных исследований, результаты которых приведены в табл. 1 и показаны на рис. 3. В одинаковых температурных условиях (температура грунта –5°C) прочностные свойства одного и того же грунта зависят от содержания в них газов. Снижение прочности грунтов начинается уже при 2% содержании газовой компоненты, при его увеличении до 5% интенсивность снижения прочности усиливается и при увеличении содержания газов выше 8% протекает наиболее интенсивно.

Несомненно, такое изменение свойств грунтов обусловлено изменением их строения, происходящим в результате газовой выделению, развиваю-



**Рис. 2.** Изменение величины угла внутреннего трения суглинков при изменении температуры и напряженного состояния грунта: 1 – прогнозное по нормативным методикам по I и II принципу; 2 – реальное при свободном газовыделении; 3–5 – реальное при объемном давлении: 3 – 0.05; 4 – 0.1; 5 – 0.2 МПа.

щегося при высоких отрицательных температурах, что обусловлено изменением состояния и свойств диффузного слоя гидратных пленок глинистых частиц грунта ( $\beta$ -пленок) в этих условиях. Этот процесс был рассмотрен авторами ранее [2], он заключается в том, что при повышении отрицательной температуры, в грунтах происходит оттаивание  $\beta$ -пленок. В результате, при том, что в вода в порах грунта остается в мерзлом состоянии, между глинистыми частицами появляется прослойка воды (гидратные пленки), что оказывает непосредственное влияние на изменение прочностных свойств грунта в целом. Интенсивность этого процесса зависит от количества глинистых минеральных частиц в составе грунта.

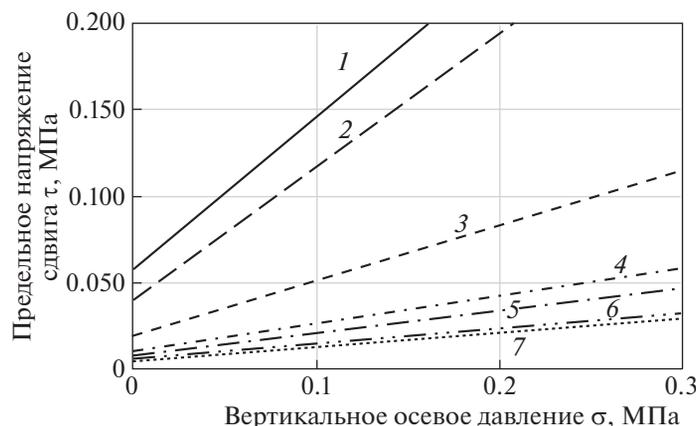
## ВЫВОДЫ

Приведенные данные показывают, что мерзлые грунты, практически повсеместно содержа-

щие газовую компоненту в своем составе, являются многокомпонентными подвижными системами, чутко реагирующими на изменения условий залегания и внешние воздействия. В результате изменения геокриологических условий меняется внутреннее строение мерзлых грунтов, что закономерно приводит к изменению их свойств. Интенсивность таких изменений усиливается при увеличении напряженного состояния грунтов, возникающего в результате возрастания техногенной нагрузки при активизации хозяйственной деятельности в арктическом регионе. Характеристика реакции мерзлых грунтов на изменение состояния криолитозоны не может быть определена при их изучении по стандартным методикам, регламентируемым действующими нормативными документами, и, следовательно, эти данные не могут быть учтены при проектировании и строительстве инженерных сооружений и объектов.

**Таблица 1.** Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  в зависимости от содержания в них газовой компоненты

Содержание газовой компоненты в грунте, %	Коэффициент внутреннего трения $\text{tg } \varphi$	Угол внутреннего трения $\varphi$ , град.	Сцепление $C$ , кПа
Газовая компонента отсутствует	0.88	41	58
2	0.77	38	40
5	0.32	18	19
8	0.16	9	10
10	0.13	7	8
15	0.09	5	6
20	0.08	5	5



**Рис. 3.** Изменение прочностных свойств мерзлых суглинков при температуре  $-5^{\circ}\text{C}$  в зависимости от содержания в них газовой компоненты: 1 – газовая компонента отсутствует; 2–7 – при содержании газов: 2 – 2; 3 – 5; 4 – 8; 5 – 10; 6 – 15; 7 – 20%.

Для преодоления этого, расчеты несущей способности грунтов и прогноз их изменения должны проводиться на основе результатов исследований, дающих наиболее полную и объективную характеристику свойств грунтов и обоснованный объективный прогноз их изменения. В настоящее время такими методами являются сдвиговые испытания грунтов и испытания в условиях трехосного (объемного) сжатия.

Вышеназванные исследования должны проводиться в условиях напряженно-деформированного состояния и температур, соответствующих современному естественному состоянию и их возможному изменению, которые должны определяться на основе районирования территории, типизации объектов инфраструктуры (основные типы инженерных сооружений и характеристика воздействия и величины нагрузок на грунты оснований) и прогноза изменения состояния криолитозоны. Проведение таких исследований должно в конечном итоге позволить повысить безопасность строительства и эксплуатации инженерных объектов и сооружений в криолитозоне и стать основой их адаптации к изменению ее состояния.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богоявленский В.И.* Выбросы газа из криолитозоны полуострова Ямал // Бурение и нефть. 2015. № 7–8 (163–164). С. 8–13.
2. *Карпенко Ф.С., Кутергин В.Н., Фролов С.И., Собин Р.В.* Влияние на свойства глинистых грунтов изменений свойств гидратных пленок при температурных воздействиях // Геоэкология. 2021. № 1. С. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010033>
3. *Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С., Седов В.В.* Новые технологии испытаний грунтов на сдвиг // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 12. 2010. М.: РУДН, С. 366–372.
4. *Кутергин В.Н., Кальберген Р.Г., Карпенко Ф.С.* Методы лабораторных исследований связных грунтов: совершенствование на основе современных научных представлений // В сб. Сергеевские чтения. Вып. 18. 2016. М.: РУДН, С. 759–764.
5. *Перлова Е.В.* Особенности газосодержания многолетнемерзлых пород на примере северо-западной части п-ва Ямал: дисс. .... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 2001. 178 с.
6. *Чувиллин Е.М., Перлова Е.В.* Формы нахождения и условия формирования газовой компоненты мерзлых пород // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 1999. № 5. С. 55–57.
7. *Чувиллин Е.М., Перлова Е.В., Дубиняк Д.В.* Экспериментальное моделирование условий существования газовых гидратов в морских отложениях п-ова Ямал // В сб. Материалы Второй конференции геокриологов России. Т. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. С. 169–173.
8. *Якушев В.С.* Состав, строение и свойства мерзлых гидратонасыщенных отложений: дисс. .... канд. г.-м. н. М.: МГУ, 1991. 132 с.
9. *Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin R.V.* Investigation of the Dynamics of Gas Emission from Frozen Soils with Change in Temperature and Pressure // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020. V. 57. № 4. P. 305–311.
10. *Sergeev D., Khimenkov A., Tipenko G., Vlasov A., Cauquil E., Green E., Dauboin P., Stanilovskaya J., Mnushkin M.* Yamal Craters: State of Knowledge and Wished In-situ Investigations // XI. International Conference on Permafrost 20–24 June 2016. Potsdam. Germany p. 997.

## METHODS OF STUDYING THE PROPERTIES OF FROZEN SOILS AND PREDICTION OF THEIR CHANGES

F. S. Karpenko<sup>a, #</sup>, V. N. Kutergin<sup>a</sup>, E. O. Dernova<sup>a</sup>, and A. A. Osokin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: kafs08@bk.ru*

Frozen soils are traditionally considered as stable formations, the change of structure and properties of which can occur only during the transition from the frozen to the melt phase state. At the same time, the results of recent scientific and practical studies show that these changes, being gradual, begin already in the frozen state. This is confirmed by the modern activation of exogenous geological processes in the permafrost zone, which is caused by climatic changes taking place at the present time. Climate fluctuations cause a natural gradual increase in the soil temperature of the permafrost zone, which leads to a change in its condition and structure. Almost everywhere, frozen soils include a gas component. It is believed that it does not have a significant effect on the properties of the host soils, provided that their frozen phase state is preserved. The results of the conducted studies show that the migration of gases in soils begins already in conditions of elevated negative temperatures, at which the soil as a whole remains in a frozen aggregate state. The intensity of this process has a significant impact on the dynamics of changes in the strength properties of frozen soils in violation of the conditions of their natural occurrence as a result of temperature exposure and the action of loads. For a reliable study of these processes, there is currently no development and practical application of new methods for determining the strength properties of frozen rocks using direct research methods, such as triaxial and shear tests. The results of such studies should serve as a basis for the design and construction of new engineering structures, as well as the adaptation of existing structures in the regions of permafrost distribution.

**Keywords:** *cryolithozone, frozen soils, gas inclusions, gas release, investigation of the properties of frozen soils by the method of triaxial compression and shear tests*

### REFERENCES

1. Bogoyavlenskii, V.I. *Vybrosy gaza iz kriolitozony poluostrova Yamal* [Gas emissions from the cryolithozone of the Yamal Peninsula]. *Burenie i neft*, 2015, no. 7–8 (163–164), pp. 8–13. (in Russian)
2. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Frolov, S.I., Sobin, R.V. *Vliyaniye na svoystva glinistykh gruntov izmeneniiy svoystv gidratnykh plenok pri temperaturnykh vozdeistviyakh* [Influence of changes in the properties of hydrate films on the properties of clay soils under temperature effect]. *Geoekologiya*, 2021, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.31857/S0869780921010033> (in Russian)
3. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Sedov, V.V. *Novyye tekhnologii ispytaniy gruntov na sdivig* [New technologies of soil shear testing]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 12, Moscow, 2010, pp. 366–372. (in Russian)
4. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S. *Metody laboratornykh issledovaniy svyaznykh gruntov: sovershenstvovaniye na osnove sovremennykh nauchnykh predstavlenii* [Methods of laboratory studies of cohesive soils: improvement on the basis of modern scientific concepts]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 18, Moscow, 2016, pp. 759–764. (in Russian)
5. Perlova, E.V. *Osobennosti gazosoderzhaniya mnogoletnykh porod na primere severo-zapadnoi chasti p-va Yamal* [Features of the gas content of permafrost rocks on the example of the north-western part of the Yamal Peninsula]. Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 2021, 178 p. (in Russian)
6. Chuvilin, E.M., Perlova, E.V. *Formy nakhozhdeniya i usloviya formirovaniya gazovoi komponenty merzlykh porod* [The forms of occurrence and conditions for the formation of the gas component of frozen rocks]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geolog.*, 1999, no. 5, pp. 55–57. (in Russian)
7. Chuvilin, E.M., Perlova, E.V., Dubinyak, D.V. *Experimental'noye modelirovaniye uslovii sushchestvovaniya gazovykh gidratov v morskikh otlozheniyakh p-ova Yamal* [Experimental modeling of the conditions of existence of gas hydrates in marine sediments of the Yamal Peninsula]. *Materialy Vtoroi konferentsii geokriologov Rossii* [Proc. 2nd Conference of Russian Geocryologists]. Vol. 1, Moscow, 2001, pp. 169–173. (in Russian)
8. Yakushev, V.S. *Sostav, stroeniye i svoystva merzlykh gidratonasyshchennykh otlozhenii* [Composition, structure and properties of frozen hydrate-saturated sediments]. Cand. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, Moscow St. Univ. Publ., 1991, 132 p. (in Russian)
9. Karpenko, F.S., Kutergin, V.N., Kotov, P.I., Sobin, R.V. Investigation of the dynamics of gas emission from frozen soils with change in temperature and pressure. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, vol. 57, no. 4, pp. 305–311.
10. Sergeev, D., Khimenkov, A., Tipenko, G., Vlasov, A., Cauquil, E., Green, E., Dauboin, P., Stanilovskaya, J., Mnushkin, M. Yamal craters: state of knowledge and wished in-situ investigations. XI. International Conference on Permafrost 20–24 June 2016. Potsdam. Germany p. 997.