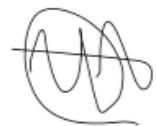


На правах рукописи



Агапкин Иван Аркадьевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ЗАСОЛЕННОСТИ НА
СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ ПО
ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ГРУНТОВ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ
БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ)**

Специальность 1.6.7 – инженерная геология, мерзлотоведение и
грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук

кандидат геолого-минералогических наук,
доктор геокриологии им. Г.З. Перльштейна
ИГЭ РАН

Официальные оппоненты **Комаров Илья Аркадьевич**

Комаров Илья Аркадьевич

*доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры геокриологии геологического факультета
МГУ имени М В Ломоносова*

Садуртдинов Марат Ринатович

кандидат технических наук,

ведущий научный сотрудник отдела мониторинга и информационно-геосистемного моделирования криолитозоны

ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск.

Защита диссертации состоится 07 апреля 2026 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.054.01 (Д 002.048.02) на базе ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук» (ИГЭ РАН) по адресу: 109004, г. Москва, ул. Николоямская, д.51.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГЭ РАН по адресу: 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2 и на интернет-сайте: <https://geoenv.ru/science/dissertacionnyj-sovet/zashita-dissertacij/zashita-dissertacii-ia-agapkin/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные подписью и печатью учреждения, просим направлять по адресу: 101000, г. Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2., а/я 145, ИГЭ РАН.

Автореферат разослан

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

Fyuganof

Е.В. Булдакова

Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Интенсивное освоение прибрежных территорий Арктики требует разработки современных технологий, которые помогут оптимизировать процессы строительства и мониторинга сооружений в условиях распространения мерзлых засоленных грунтов. В связи с ростом объёмов изысканий особую актуальность приобретает создание оценочных методик, позволяющих значительно сократить количество длительных и дорогостоящих лабораторных исследований.

Объектом исследований являются засоленные мерзлые дисперсные грунты северной части Большеземельской тундры.

Предметом исследований являются зависимости свойств мерзлых засоленных грунтов от степени их засоленности.

Цель и задачи исследований. Целью работы является определение сопоставимости показателей свойств засоленных мерзлых дисперсных грунтов (фазового состояния (мерзлое/талое), содержания незамерзшей воды, величины эквивалентного сцепления), определенных прямыми лабораторными методами и лабораторными геофизическими измерениями.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ и обобщение современного состояния проблемы изученности определения физических и механических свойств мерзлых грунтов геофизическими методами.
2. Провести экспериментальные исследования по определению физических, механических и геофизических параметров на модельных мерзлых засоленных дисперсных грунтах.
3. Обобщить результаты экспериментальных исследований и выявить основные взаимосвязи физических, механических параметров.
4. Разработать методику оценки фазового состояния (мерзлое/талое) засоленных грунтов геофизическими методами (по данным скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления).

5. Апробировать методику оценки содержания незамерзшей воды мерзлых засоленных грунтов на основе геофизических измерений (по данным скорости продольных волн).
6. Разработать методику оценки эквивалентного сцепления мерзлых засоленных грунтов на основе геофизических измерений (по данным скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления).

Научная новизна работы. Для определения корреляционных зависимостей между физико-механическими и геофизическими характеристиками мерзлых засоленных грунтов предложено использование концентрации порового раствора в качестве обобщающего параметра, влияющего как на эквивалентное сцепление, так и на скорость продольных волн и удельное электрическое сопротивление.

Разработана методика оценки эквивалентного сцепления засоленных мерзлых грунтов по данным измерений удельного электрического сопротивления, которая исключает необходимость проведения испытаний шариковым штампом для каждой температурной ступени.

Разработана методика оценки фазового состояния грунта на основе определения скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления.

Практическая значение работы. Разработанные методики направлены на экономическую оптимизацию объёмов и сроков изыскательских работ. Результаты исследований могут использоваться при последующей разработке систем геокриологического и геотехнического мониторинга в части оценки временной и пространственной изменчивости свойств мерзлых засоленных грунтов с помощью геофизических измерений.

Личный вклад автора. Анализ и систематизация данных по применению геофизических методов для оценки свойств мерзлых грунтов на основе опубликованных статей и монографий, а также фондовых материалов по буровым скважинам, геофизике и др. смежным дисциплинам.

Проведение лабораторных исследований мерзлых засоленных грунтов, включающих определение физико-механических и геофизических характеристик. Выявление корреляционных зависимостей между грунтовым и геофизическими характеристиками, а также объяснение их природной взаимосвязи.

Создание методик для оценки свойств мерзлых засоленных грунтов по данным лабораторных геофизических измерений.

На защиту выносятся следующие защищаемые положения:

1. Применение методов электроразведки для изучения мерзлых засоленных грунтов предпочтительнее методов сейсморазведки, так как на примере модельных образцов из грунтов северной части Большеземельской тундры показано, что в температурном диапазоне от -2 до -6 °C изменение удельного электрического сопротивления (УЭС) от слабозасоленного к сильнозасоленному состоянию происходит в 2-22 раза, а изменение скорости продольных волн менее значительно — в 1,5-1,8 раза.
2. Оценка температуры начала замерзания модельных образцов из грунтов Большеземельской тундры может быть выполнена по данным УЭС и скорости продольных волн. Наибольшая сходимость оценочных и экспериментальных значений получена при использовании удельного электрического сопротивления для образцов суглинка, что обусловлено высокой чувствительностью электропроводности суглинка к изменению порового раствора и количества незамерзшей воды при переходе через температуру начала замерзания.
3. Оценка величины эквивалентного сцепления модельных образцов из грунтов Большеземельской тундры может быть выполнена по замерам УЭС. Такая оценка надежнее для суглинков, что связано с большим содержанием незамёрзшей воды в глинистых грунтах, выступающей в роли электропроводящей жидкости. Большее содержание жидкой фазы уменьшает величину эквивалентного сцепления и в тоже время увеличивает взаимосвязь с УЭС.

Апробация работы проводилась на российских (Москва 2018, 2021, 2022; Тюмень 2019, 2021; Петропавловск-Камчатский, 2020; Якутск, 2020; Звенигород, 2022) и международных конференциях (Брюссель, Бельгия, 2018; Шамони-Мон-Блан, Франция, 2018; Баку, Азербайджан, 2018). Основные результаты опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 3 публикациях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов ВАК.

Структура и объем диссертации. Данная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы общим объемом 121 страницу. Диссертация содержит 33 рисунка и 10 таблиц. Список использованной литературы включает 114 наименований.

Благодарности. Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю к.г-м.н. Д.О. Сергееву и сотрудникам лаборатории геокриологии ИГЭ РАН за помощь и поддержку на всех этапах работы. Автор крайне признателен к.г-м.н. Р.Г. Кальбергенову и к.г-м.н Ф.С. Карпенко за плодотворное сотрудничество и консультации на протяжении всего времени выполнения работы. Автор благодарит к.г-м.н П.И. Котова и д.г-м.н А.В. Кошурникова за ценные советы и рекомендации, а также предоставление необходимого оборудования. Автор признателен сотрудникам кафедры геокриологии геологического факультета МГУ за содействие выполнению работы.

Содержание работы

В первой главе представлен обзор литературы (исследования Аксенова В.И., Брушкова А.В., Дубикова Г.И., Комарова И.А., Зыкова Ю.Д., Роман Л.Т., Фролова А.Д. и др.), посвященный как особенностям свойств мерзлых засоленных грунтов, так и основным проблемам исследования корреляционных зависимостей между их физическими свойствами и геофизическими параметрами. Также рассматриваются ключевые понятия и теории, касающиеся применения геофизических методов для оценки свойств мерзлых грунтов.

Исследования предшественников показали, что методы георадиолокации и радиоизотопные методы возможно применять для оценки таких физических свойств, как влажность и плотность. Основными методами для оценки физико-механических свойств являются сейсмоакустические методы и электроразведка.

С помощью скорости продольных и поперечных волн возможно оценить такие характеристики, как содержание незамерзшей воды, модуль деформации, коэффициент Пуассона, сцепление, прочность на сжатие, прочность на растяжение, эквивалентное сцепление. В корреляционных уравнениях используются зависимости линейного, параболического и экспоненциального вида, а также полином второй степени, в зависимости от методики эксперимента и изучаемого свойства.

На основе электроразведки можно оценить с помощью электропроводности или удельного электрического сопротивления содержание незамерзшей воды. Нужно отметить, что электроразведка наиболее удобна в работе с засоленными грунтами, потому что засоленный поровый раствор значительно больше влияет на сложную многокомпонентную систему мерзлого грунта. Согласно допущению закона Арчи УЭС порового раствора грунта определяет УЭС самого грунта, при этом содержание незамерзшей влаги существенно влияет на прочностные свойства мерзлых грунтов. Важно отметить, что большинство представленных методик по оценке прочностных характеристик не рассматривают фактор времени, в течении которого значение прочностных характеристик снижается.

Таким образом на прочность мерзлых грунтов влияет множество факторов: минеральный состав, криогенное строение, боковое давление, нагрузка, динамическая нагрузка, льдистость, засоленность, время, гранулометрический состав, температура. При этом есть факторы в массиве, которые условно статичны, например, гранулометрический состав, минеральный состав, а есть факторы, изменчивые во времени: температура, содержание незамерзшей воды, нагрузка. При этом содержание незамерзшей

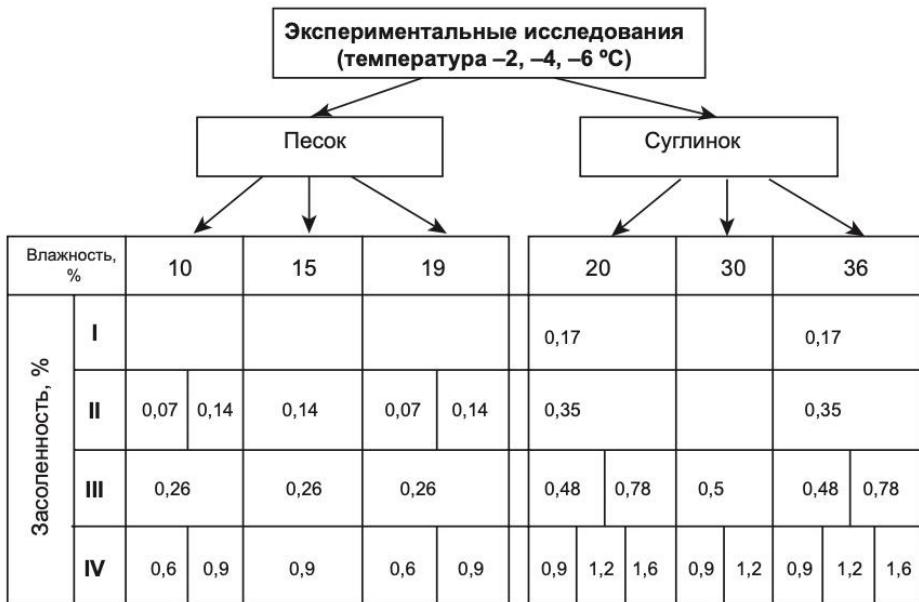
воды будет являться важнейшей характеристикой, так как от нее зависит соотношение твердой (льда) и жидкой фаз воды в грунте. В связи с этой многофакторностью задачи прогноз прочностных свойств мерзлых грунтов с помощью геофизики до сих пор не нашел широкого применения в практике, а существующие методики требуют доработок и опытов в полевых условиях. Кроме того, в большинстве работ по применению геофизических методов для оценки свойств мерзлых грунтов исследовались незасоленные грунты. Поэтому в данном исследовании рассматриваются именно мерзлые засоленные грунты.

Во второй главе рассмотрены характеристики грунтов, методика подготовки образцов и планирование экспериментов.

Исследования проводились на двух разновидностях грунта (песок и суглинок), отобранных в северной части Большеземельской тундры. При этом выбранные грунты являются наиболее типичными разновидностями дисперсных грунтов для криолитозоны России (Романовский, 1993)

Для грунтов нарушенного сложения искусственно задавались значения влажности и засоленности (рис.1). В результате создавались модельные грунты, которые сохраняли гранулометрический и минеральный составы, плотность, а задаваемые диапазоны влажности и засоленности соотносились с натурными диапазонами значений этих характеристик. В качестве соли использовался NaCl, что соответствует морскому типу засоления. Ступени засоленности задавались таким образом, чтобы модельные грунты отражали основных градации степени засоленности для мерзлых грунтов: слабозасоленный, среднезасоленный и сильнозасоленный. Ступени влажности задавались так, чтобы отражать минимальные, средние и максимальные значения влажности для рассматриваемого района исследований (схема проведения экспериментов).

Исходные характеристики грунтов*



* Примечания: I — незасоленный, II — слабозасоленный, III — среднезасоленный, IV — сильнозасоленный (согласно классификации ГОСТ 25100-2020).

Рисунок 1. Схема проведения экспериментов.

Для создания массивной криогенной текстуры образцы подвергались быстрому замораживанию с целью избежания миграции влаги, для этого их помещали в холодильную камеру с температурой -10 °C и выдерживали в течение суток. Контроль миграции влаги осуществлялся на дополнительных образцах, которые после замораживания вскрывались.

Для определения механических свойств грунтов был выбран метод шарикового штампа, методика проведения которого входит в ГОСТ 12248.7-2020, а значение эквивалентного сцепления используется для расчета несущей способности грунтов оснований и деформаций согласно СП 25.13330.2020. Для каждого образца проводилось по 1 длительному испытанию (до стабилизации деформации) и по 3 ускоренных 8 часовых.

Для оценки удельного электрического сопротивления использовался метод Микро-ВЭЗ. Измерительная установка была создана по примеру четырехэлектродной установки Шлюмберже (AMNB).

Определение скорости продольных волн проводилось с помощью дефектоскопа УД2Н-П. Импульсные ультразвуковые измерения проводились с помощью пьезодатчиков поршневого типа.

Температуры начала замерзания определялась с помощью комплекса Kriolab T_{bf} на тех же грунтах, отобранных в районе полуострова Медынский заворот (песок с влажностью 14 % и засоленностью 0,15 %, 0,26 %, 0,9 %, суглинок с влажностью 26 % и засоленностью 0,42 %, 0,9 %, 1,6 %).

Содержание незамерзшей воды определялось двумя расчетными и одним экспериментальным методами. Для проведения экспериментов использовались мерзлые грунты ненарушенного сложения (супесь и глина) различной влажности и засоленности (супесь с влажностью 27,5 %, засоленностью 0,25 % и влажностью 23 %, засоленностью 1,1 %; глина с влажностью 38,2 %, засоленностью 0,4 % и влажностью 28,5 %, засоленностью 0,89 %).

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований, выполнен корреляционный анализ полученного массива данных, а также предложены методики оценки физико-механических свойств исследуемых грунтов на основе геофизических измерений.

Механические свойства мерзлых засоленных грунтов

Установлено, что повышение нормативной степени засоленности от слабой до сильной вызывает восьмикратное снижение эквивалентного сцепления в модельных мерзлых песках и суглинках. Рост эквивалентного сцепления обусловлен увеличением доли льдоцементных связей, формирующихся при повышении объемной влажности и понижении температуры. При прочих равных условиях значения сцепления у мерзлых засоленных суглинков оказываются ниже, чем у песков, что объясняется повышенным содержанием незамерзшей воды и, соответственно, меньшим количеством криогенных цементирующих связей в глинистых грунтах. В случае сильной засолённости величина сцепления для обеих исследуемых фаций не превышает 0,1 МПа, что свидетельствует о доминирующей роли

данного фактора в формировании прочностных характеристик мерзлых грунтов.

Влияние засоленности на удельное электрическое сопротивление и скорость продольных волн

На рисунке 2 представлен пример зависимости а) удельного электрического сопротивления и б) скорости продольных волн мерзлых песка и суглинка от засоленности. Удельное электрическое сопротивление при увеличении засоленности от 0,07 до 0,9 % для песка уменьшается в 12 раз ($T=-4^{\circ}\text{C}$) и 10 раз ($T=-6^{\circ}\text{C}$), а скорость продольных волн — в 2,1 раза ($T=-4^{\circ}\text{C}$) и 1,6 раза ($T=-6^{\circ}\text{C}$).

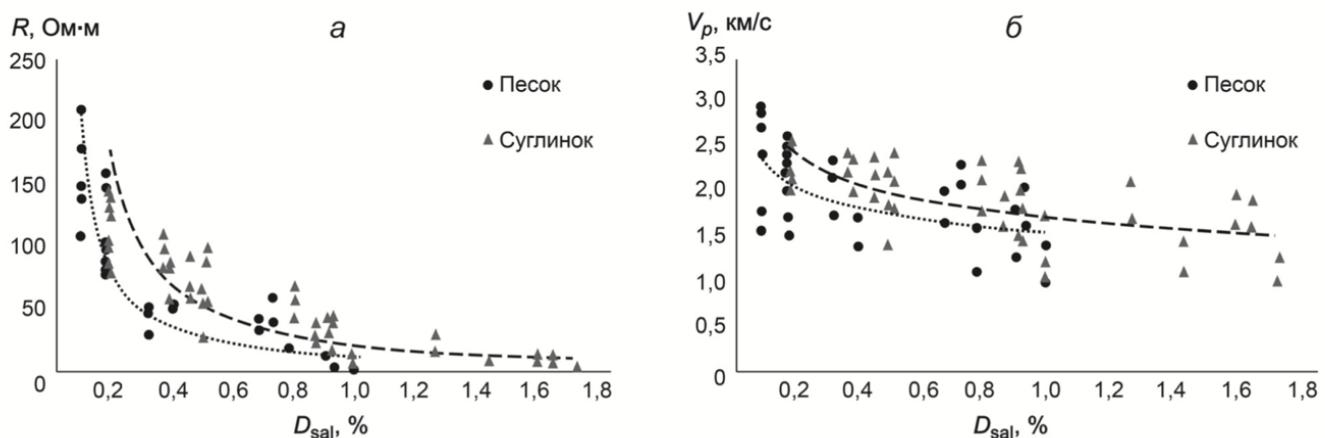


Рисунок 2. Зависимость удельного электрического сопротивления R и скорости продольных волн V_p от засоленности D_{sal} в грунтах при различных влажности и температуре.

Для суглинков наблюдается та же зависимость. Удельное электрическое сопротивление при увеличении засоленности от 0,17 до 1,6 % для суглинка уменьшается в 13 раз ($T=-4^{\circ}\text{C}$) и 9 раз ($T=-6^{\circ}\text{C}$), а скорость продольных волн — в 1,5 раза ($T=-4^{\circ}\text{C}$) и 1,3 раза ($T=-6^{\circ}\text{C}$). При уменьшении температуры разница уменьшается за счет сокращения количества незамерзшей воды и увеличения количества льдоцементных связей. Сравнение геофизических данных при температуре -2°C не проводилось, так как средне- и сильнозасоленные грунты находились в талом состоянии.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что засоленность — важнейший фактор, влияющий на значения геофизических свойств. Однако для прогноза изменения свойств грунтов необходимы универсальные показатели, которые позволили бы прогнозировать геофизические свойства грунта вне зависимости от типа грунта, влажности и т.д. Для решения этой задачи был проведен корреляционный анализ геофизических параметров и физических свойств (плотность, влажность, засоленность и т.д.), показателей состава (льдистость, количество незамерзшей воды, концентрация порового раствора), а также их различных сочетаний. Всего рассмотрено более 20 параметров.

В результате получено, что удельное электрическое сопротивление, как для песка, так и для суглинка, лучше всего коррелирует с концентрацией солей в поровом растворе (рис. 3).

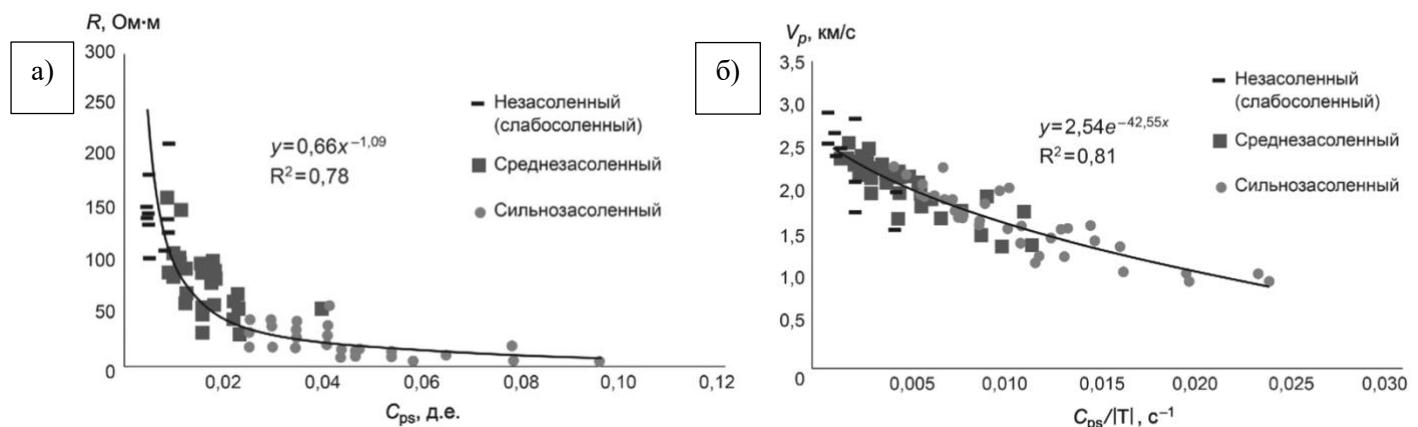


Рисунок 3. а) Зависимость удельного электрического сопротивления R от концентрации порового раствора C_{ps} ; б) Зависимость скорости продольных волн V_p от симплексного показателя в исследуемых грунтах.

Коэффициент аппроксимации, который позволяет оценить качество построенной модели, имеет высокое значение 78 % для удельного электрического сопротивления, причем наибольший разброс данных отмечен для незасоленных и слабозасоленных грунтов (рис. 3а).

Скорость продольных волн лучше всего коррелирует с симплексным параметром (отношение концентрации солей в поровом растворе к температуре испытаний) (рис. 3б).

Анализ полученных нами данных позволил заключить, что, несмотря на различия дисперсности песка и суглинка, прослеживается также зависимость скорости продольных волн от концентрации порового раствора. Однако на упругие свойства оказывает влияние также увеличение льдоцементных связей, которые возникают при понижении температуры, поэтому в качестве обобщающего параметра и было выбрано отношение концентрации солей в поровом растворе к температуре испытаний. Коэффициент аппроксимации имеет высокое значение — 81 %.

Таким образом, значения скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления наиболее существенно зависят от концентрации порового раствора. Наиболее высокими значениями геофизических свойств характеризуются незасоленные и слабозасоленные грунты, наиболее низкими — сильнозасоленные; влияние гранулометрического состава, влажности и температуры грунтов, отмечаемое в незасоленных грунтах, также сохраняется, однако имеет подчиненный (по сравнению с влиянием засоленности) характер (табл. 1).

Таблица 1. Изменение скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления в зависимости от типа засоленности.

Тип грунта	Темпе- ратура, °C	V_p , км/с	R , Ом·м
Суглинок слабозасоленный	-2...-6	2,41–1,92	140–60
Суглинок сильнозасоленный		1,77–1,08	45–5
Песок слабозасоленный		2,92–1,57	210–110
Песок сильнозасоленный		1,8–1,1	61–5

При этом области возможных значений геофизических свойств частично перекрываются для средне и сильнозасоленных грунтов.

В результате выполненных исследований получены данные о высокой корреляции удельного электрического сопротивления с концентрацией порового раствора и отношения концентрации солей в поровом растворе к температуре со скоростью продольных волн. При этом эти зависимости являются обобщающими для всех вариаций параметров (типа грунта, влажности засоленности) особенно для средне и сильнозасоленных грунтов.

Показано, что значения удельного электрического сопротивления могут уменьшаться в 2–22 раза при переходе от слабозасоленного состояния к сильнозасоленному, а для значений скорости продольных волн это отличие не превышает 2 раз. Для сильнозасоленных грунтов удельное электрическое сопротивление перестает зависеть от литологического состава и определяется только концентрацией порового раствора. Этот факт может служить основой для разработки экспресс-метода определения засоленности при известной влажности грунтов. Поэтому именно электрические свойства наиболее подходят для ранжирования грунтов по степени засоленности.

Оценка величины эквивалентного сцепления мерзлых засоленных грунтов на основе измерений удельного электрического сопротивления
 Результаты статистической обработки измеренных характеристик грунтов (эквивалентное сцепление, скорость продольных волн, удельное электрическое сопротивление) показали, что коэффициент их вариации не превышает 0,15 для 96 % опытов, что свидетельствует о достаточно однородной выборке и возможности использования полученных данных для поиска корреляционных зависимостей.

Установлена хорошая взаимосвязь между эквивалентным сцеплением и удельным электрическим сопротивлением, а также скоростью продольных волн. При этом наибольший коэффициент детерминации между эквивалентным сцеплением и удельным электрическим сопротивлением (0,86) был получен при использовании квадратичной функции, а между

эквивалентным сцеплением и скоростью продольных волн (0,69) – степенной (рис. 4).

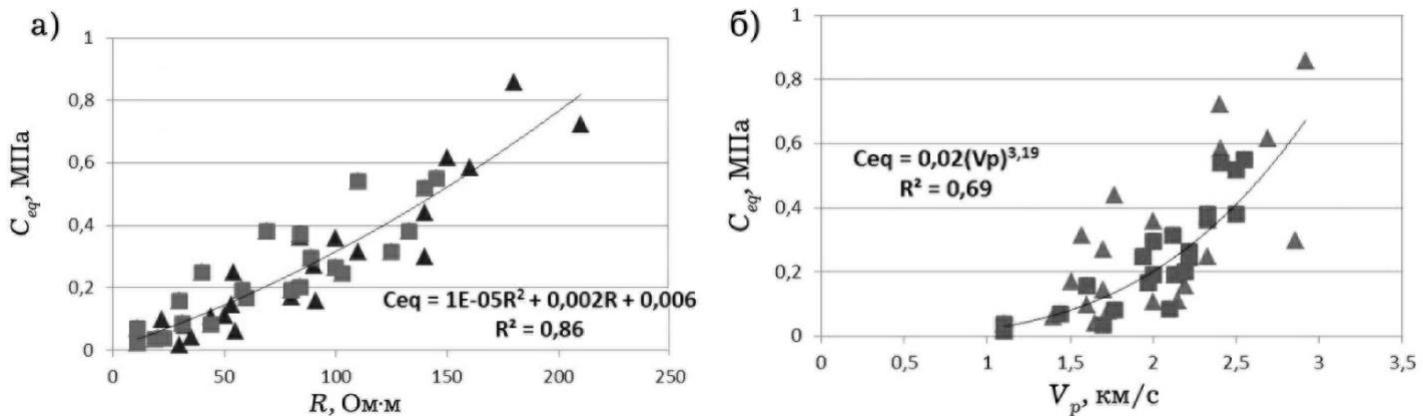


Рисунок 4. Зависимость эквивалентного сцепления C_{eq} от удельного электрического сопротивления R и скорости продольных волн V_p для модельных грунтов: песок (треугольник); суглинок (квадрат).

Эти данные вполне согласуются с результатами предыдущих исследований (Li D. et al., 2015). Таким образом, геофизические параметры могут использоваться для прогноза эквивалентного сцепления с достаточно высокой степенью точности.

Анализ зависимостей эквивалентного сцепления C_{eq} и геофизических параметров от обобщающих симплексных характеристик (рис. 5) показал, что именно УЭС может быть использовано для прогноза эквивалентного сцепления засоленных грунтов.

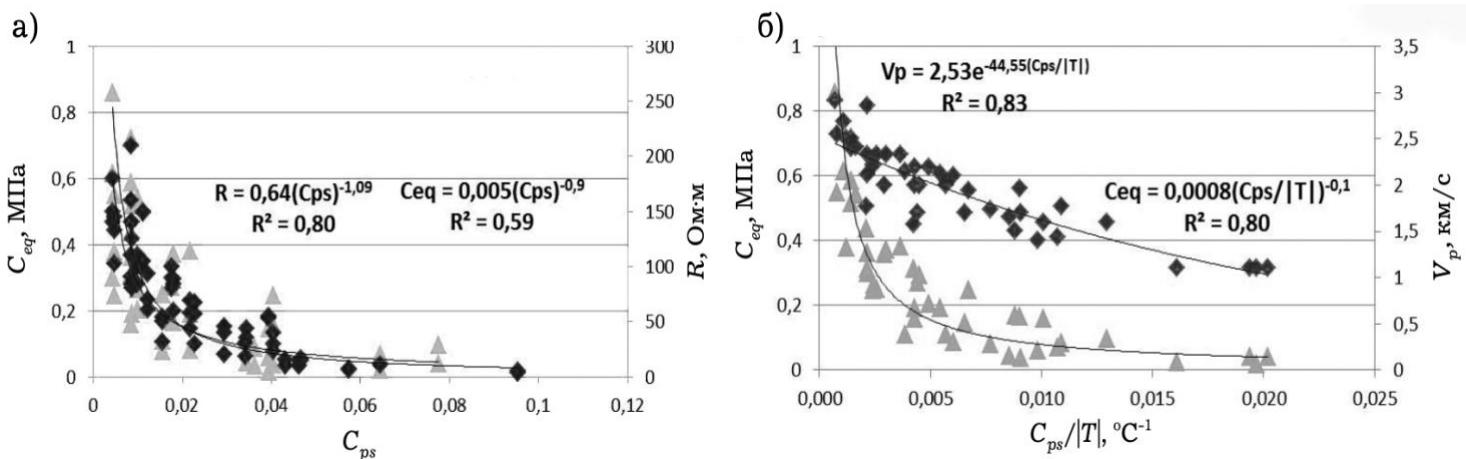


Рисунок 5. Зависимость эквивалентного сцепления C_{eq} (треугольник) от: а) удельного электрического сопротивления R и концентрации порового раствора C_{ps} ; б) скорости продольных волн V_p (ромб) и симплексного показателя.

Использование предельно-длительной прочностной характеристики в значительной степени снизит неопределенность и повысит точность прогноза по геофизическим данным, а также позволит выполнить сравнение результатов разных авторов. Корреляция между предельно-длительными C_{eq} и удельным электрическим сопротивлением гораздо выше, чем для условно-мгновенных значений прочности, рассматривавшихся, например, в работах Фролова (2005) и Зыкова (1989). К тому же условно-мгновенные значения прочности в инженерных расчетах используются редко.

Следующий фактор, который усложняет широкое применение корреляционных зависимостей, – многокомпонентность состава мерзлых грунтов. Однако, если рассмотреть случай однородного массива грунта, то при изменении температуры произойдет изменение прочностных и геофизических параметров за счет изменения соотношения льда и незамерзшей воды, в то время как все остальные факторы (гранулометрический состав, влажность, плотность и др.) не изменятся. Таким образом, можно сделать прогноз механических характеристик на основе данных геофизических свойств. Для примера используем удельное электрическое сопротивление, для которого, учитывая установленную тесную корреляционную связь, должно выполняться следующее соотношение:

$$C_{eq(T)}/C_{eq(T-n)} = k R_{(T)}/R_{(T-n)}, \quad (1)$$

где $C_{eq(T)}$ и $C_{eq(T-n)}$ – эквивалентное сцепление при самой низкой температуре и при повышении температуры на n градусов, соответственно, $R_{(T)}$ и $R_{(T-n)}$ – удельное электрическое сопротивление при самой низкой температуре и при повышении температуры на n градусов, соответственно, k – экспериментальный параметр.

Экспериментальные исследования проводились при трех температурах, поэтому рассмотрены три ступени повышения температуры от -6°C до -4°C , от -6°C до -2°C , от -4°C до -2°C . Получено, что данные лучше всего описываются степенной зависимостью (рис. 6 и 7).

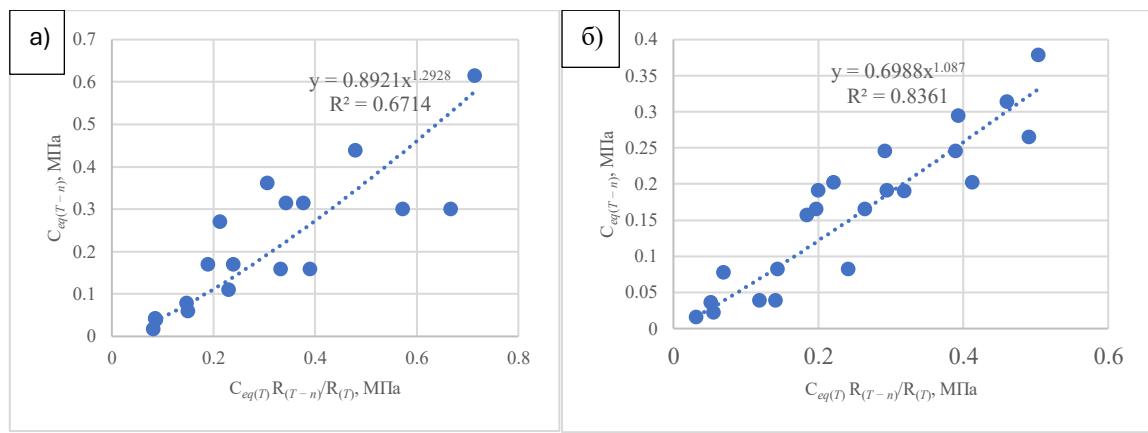


Рисунок 6. Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для образцов песка (а) и суглинка (б).

Для песков (рис. 6а) и суглинков (рис. 6б) получены величины достоверной аппроксимации между прогнозными и экспериментальными значениями эквивалентного сцепления 67 % и 84 % соответственно. Как уже было сказано ранее, засоленность сильнее влияет на песчаные образцы из-за меньшего содержания глинистых частиц, поэтому степень соответствия трендовой модели исходным данным для песков ниже, чем для суглинков.

Наибольшие несоответствия между экспериментальными и прогнозными значениями были установлены для сильнозасоленных образцов при наибольшей температуре исследований (-2 °C). Такие образцы находятся на границе фазовых переходов, поэтому при проведении опытов с ними вероятность погрешности увеличивается.

Из графиков с рисунка 6 видно, что кривые для песков и для суглинков схожи и лучше всего аппроксимируются степенной функцией, поэтому была выведена обобщающая формула вне зависимости от разновидности грунта (рис. 7):

$$C_{eq(T-n)} = 0,77(C_{eq(T)} R_{(T-n)}/R_{(T)})^{1,16}, \quad (2)$$

где $C_{eq(T)}$ и $C_{eq(T-n)}$ – эквивалентное сцепление при самой низкой температуре и при повышении температуры на n градусов, соответственно, $R_{(T)}$ и $R_{(T-n)}$ – удельное электрическое сопротивление при самой низкой температуре и при

повышении температуры на n градусов, соответственно, k – экспериментальный параметр.

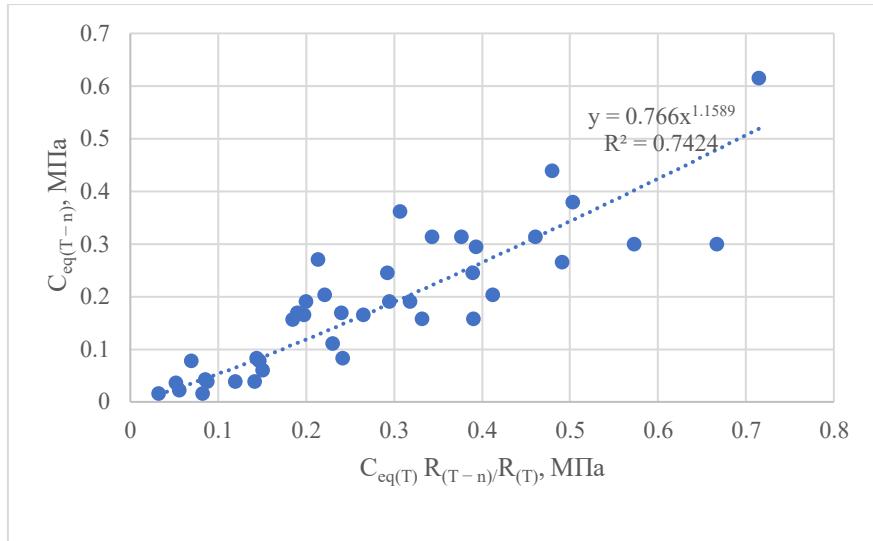


Рисунок 7. Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для песков и суглинков.

Таким образом, если провести испытания в лабораторных условиях по определению предельно-длительного C_{eq} и R при одной температуре, а при других выполнить только измерения электрических свойств, то можно сделать прогноз изменения C_{eq} с высокой степенью точности и сократить время проведения испытаний.

Если в лабораторных условиях можно определить большинство показателей и подобрать наилучшее математическое описание, то в полевых условиях это сделать невозможно. Данные инженерных изысканий по механическим и геофизическим характеристикам могут использоваться для прогноза изменения прочностных характеристик при геофизическом мониторинге.

Оценка мерзлого и талого состояния мерзлых засоленных грунтов по данным геофизических измерений

Анализ формул для расчета температуры начала замерзания показывает, что эта характеристика определяется двумя параметрами – типом грунта и концентрацией порового раствора. Поэтому для определения состояния

мерзлых грунтов необходимо предложить подход для оценки температуры начала замерзания по данным скорости распространения продольных волн и удельного электрического сопротивления. Для этого проведены лабораторные исследования на модельных образцах грунтов различного состава и засоленности.

В результате выполненных исследований получены данные о высокой корреляции удельного электрического сопротивления с концентрацией порового раствора и отношения концентрации солей в поровом растворе к температуре со скоростью продольных волн. При этом эти зависимости являются обобщающими для всех вариаций параметров (типа грунта, влажности, засоленности) особенно для средне и сильнозасоленных грунтов (Koshurnikov, 2020). Таким образом, получены следующие формулы для оценки концентрации порового раствора:

$$C_{ps} = 0,32 \rho^{-0,72} \quad (3),$$

$$C_{ps} = |T|0,032 V_p^{-2,84} \quad (4),$$

где C_{ps} – концентрация порового раствора, ρ – удельное электрическое сопротивление, T – температура грунта, V_p - скорость продольных волн.

Расчеты температуры начала замерзания проводились с использованием формулы $T_{bf} = A - B(53C_{ps} + 40C_{ps}^2)$ согласно СП 25.13330.2020. При этом концентрация порового раствора была рассчитана различными способами:

- 1) по данным химического анализа водных вытяжек (1 вариант);
- 2) по данным измерения удельного электрического сопротивления с использованием формулы (3) (2 вариант);
- 3) по данным измерения скорости продольных волн и температуры грунта с использованием формулы (4) (3 вариант);
- 4) измеренные значения температуры начала замерзания (эксперимент).

Для варианта 2 и 3 коэффициент А формулы T_{bf} СП 25.13330.2020, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта, принимался равным $-0,15$ $^{\circ}\text{C}$ (среднее значение, так как тип грунта не определен), а коэффициент В, зависящий от типа засоления грунта;

принимался равным единице, как для грунтов морского типа засоления. Результаты исследований для различных видов грунтов приведены на рисунке 8.

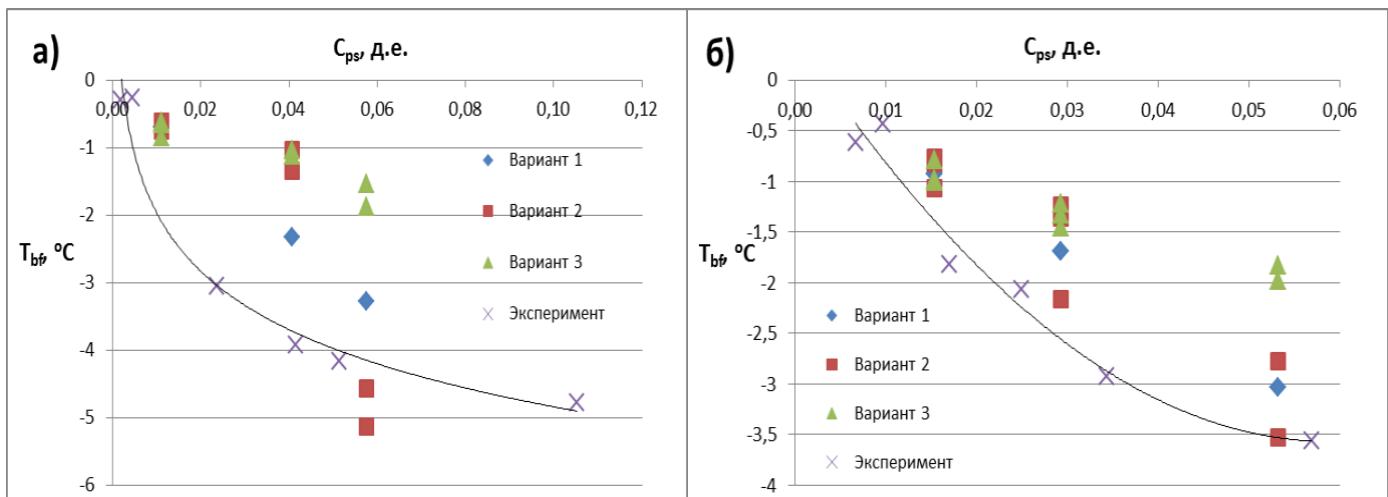


Рисунок 8. Зависимость температуры начала замерзания от концентрации порового раствора при разных вариантах расчета для песка (а), суглинка (б) (Agapkin et al., 2021).

В результате получено, что в большинстве случаев расчетная температура начала замерзания выше экспериментальных значений. Наименьшее отклонение выявлено для расчетной формулы из СП 25.13330.2020. Ведь при расчетах использовались экспериментальные значения засоленности, влажности и определен тип грунта. Расчеты, проведенные с использованием данных удельного электрического сопротивления, более приближены к данным экспериментальных исследований. При этом засоленность в большей степени влияет на температуру начала замерзания песка, что связано с особенностями строения различных видов грунтов.

Оценка содержания незамерзшей воды мерзлых засоленных грунтов по результатам определения акустических свойств

Многими исследователями были предложены различные расчетные методы, которые обычно применяются для получения быстрой информации о фазовом составе воды в мерзлой породе (Agapkin et al., 2021). При этом экспериментальные методы дают более точную информацию, в то время как

расчетные менее точны, что обусловлено большим различием пород по их генетическим, петрографическим и физико-химическим признакам, большим разнообразием зависимостей содержания незамерзшей воды от температуры, засоленности и др.

В результате проведенных исследований были получены кривые незамерзшей воды для 4 исследуемых образцов естественного сложения. При этом для каждого образца приведены три кривые (рис. 9):

- 1) по данным расчета по формуле СП 25.13330.2020:

$$W_w = \kappa_w W_p + \eta D_{sal} \text{ (вариант 1);}$$

- 2) по данным расчета по формуле Кальбергенова и Зыкова на основе измерений скоростей продольных волн при разных температурах:

$$W_w = W_{tot} - (V_{H(t=0)} - V_{(t=i)}) \frac{(W_{tot} - W_{g(t=-24)})}{(V_{H(t=0)} - V_{(t=-24)})} \text{ (вариант 2);}$$

- 3) экспериментальные значения влажности незамерзшей воды, определенные контактным методом (эксп.).

При этом W_w – содержание незамерзшей воды, κ_w – коэффициент зависящий от числа пластичности и температуры, W_p – влажность грунта на границе пластичности, η – коэффициент, зависящий от засоленности, D_{sal} – засоленность грунта; V_p – скорость продольных волн, А и В – эмпирические коэффициенты, зависящие от типа грунта; W_{tot} – суммарная влажность, W_g – гигроскопическая влажность при $t = -24$ °C, $V_{H(t=0)}$ – скорость продольных волн $t=0$ °C, $V_{(t=i)}$ – скорость продольных волн при i -той температуре, $V_{(t=-24)}$ – скорость продольных волн при $t = -24$ °C.

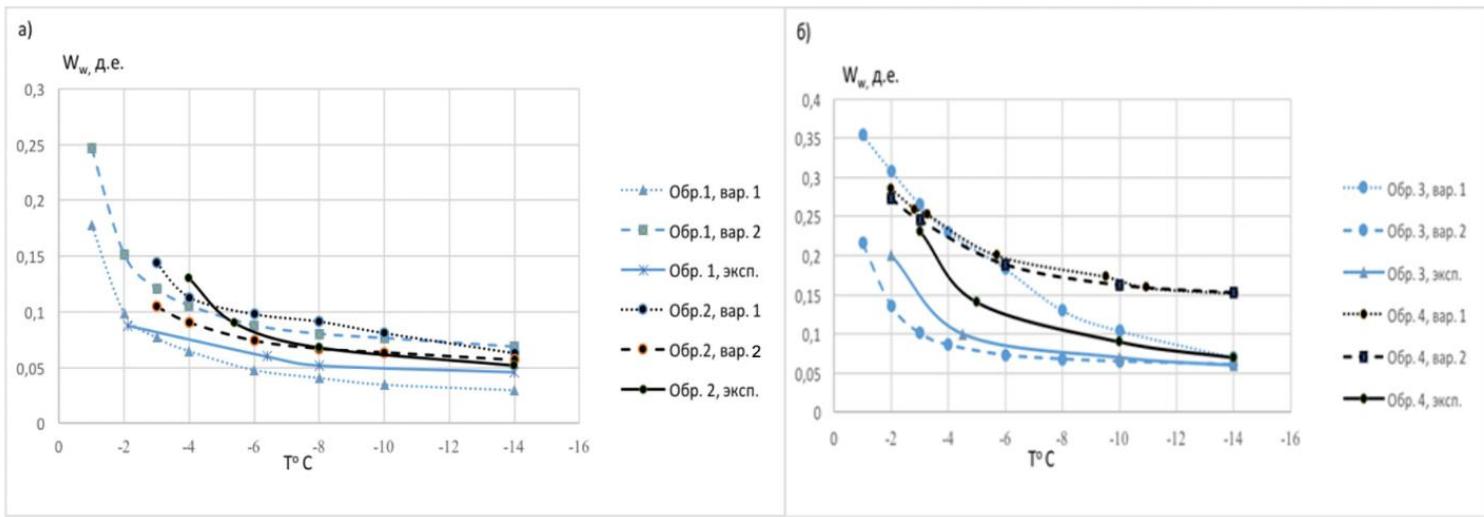


Рисунок 9. Зависимость влажности незамерзшей воды при разной отрицательной температуре для супеси (образец 1: $W_{\text{tot}}=27,5\%$; $D_{\text{sal}}=0,25\%$; образец 2: $W_{\text{tot}}=23\%$; $D_{\text{sal}}=1,1\%$) (а); для глины (образец 3: $W_{\text{tot}}=38,2\%$; $D_{\text{sal}}=0,4\%$; образец 4: $W_{\text{tot}}=28,5\%$; $D_{\text{sal}}=0,89\%$) (б) (Agapkin et al., 2021).

Для супеси с засоленностью 0,25 % (образец 1) значение влажности незамерзшей воды, полученное расчетным методом (вариант 1), несколько занижено, а по формуле (вариант 2) наоборот – заметно выше относительно результатов, полученных контактным методом. Обратная закономерность выявлена для супеси с засоленностью 1,1 % (образец 2). Такой разброс можно объяснить фактором засоленности, который усложняет процессы фазовых переходов при относительно невысоких отрицательных температурах. Для глины с засоленностью 0,4 % (образец 3) кривая незамерзшей воды (вариант 2) значительно ближе к экспериментальным данным по сравнению с расчетной кривой по формуле СП 25.13330.2020 (вариант 1). Для глины с засоленностью 0,89 % (образец 4) оба расчетных метода показали данные значительно превышающие значения, полученные экспериментальным методом.

Основные выводы

1. Установлена высокая корреляция между концентрацией порового раствора, как со скоростью продольных волн и удельным электрическим сопротивлением, так и с эквивалентным сцеплением. Наличие такой связи

делает возможным разработку методик оценки показателей свойств засоленных мерзлых грунтов на основе измерений скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления.

2. Эквивалентное сцепление модельных мерзлых песков и суглинков снижается в 8 раз с увеличением нормативной степени засолённости от слабой к сильной. Повышение объемной влажности и понижение температуры приводят к увеличению количества льдоцементных связей, что способствует росту эквивалентного сцепления. При этом эквивалентное сцепление мерзлых засолёных суглинков ниже, чем у песков, что связано с более высоким содержанием незамерзшей воды в глинистых грунтах и как следствие меньшим количеством льдоцементных связей. В условиях сильной засолённости значения сцепления для обеих грунтовых фаций не превышают 0,1 МПа, что указывает на определяющее влияние засолённости среди факторов, влияющих на прочность мерзлых грунтов.

3. Данные удельного электрического сопротивления пригодны для оценки величины эквивалентного сцепления. Разработанная методика позволяет сократить количество необходимых лабораторных испытаний, а также может быть использоваться при геофизическом мониторинге массива засоленных мерзлых грунтов. Выбор УЭС для оценочной методики обусловлен его прямой взаимосвязью с засоленностью, при этом скорость прохождения продольных волн связана с засоленностью косвенно через содержание незамерзшей воды.

4. Выбор показателя эквивалентного сцепления при оценке предельно-длительной прочности засолённого мерзлого грунта позволяет учесть фактор времени в прогнозировании прочности оснований сооружений, а также дает возможность сравнения прогнозных методик, предложенных различными авторами.

5. Апробирована методика оценки содержания незамерзшей воды мерзлых засоленных грунтов на основе результатов измерений скорости продольных волн. Данные скорости продольных волн пригодны для оценки содержания

незамерзшей воды с некоторыми погрешностями. При этом точность оценки сопоставима с расчетным методом, предложенным в СП 25.13330.2020.

6. Разработана методика оценки фазового состояния (мерзлое/талое) модельных засоленных мерзлых дисперсных грунтов. По результатам измерений скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления можно оценить концентрацию порового раствора, по величине которой рассчитывается температура начала замерзания грунта. Сравнение фактической температуры и расчетной температуры начала замерзания позволяет выявить горизонт охлажденных грунтов, что способствует обоснованию объемов изысканий, включая механические испытания.

7. Описанные закономерности и разработанные методики были получены на грунтах нарушенного сложения, обладающих морским типом засоления и имеющих массивную криогенную текстуру. Кроме того, все грунты имели одинаковую плотность и отличались только различной концентрацией порового раствора. Для практических целей требуются дальнейшие натурные исследования на грунтах ненарушенного сложения.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете 24.1.054.01 (Д 002.048.02) по специальности 1.6.7 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение», опубликованные автором по теме диссертации:

- 1) Кошурников А.В., Котов П.И., Агапкин И.А. Влияние засоленности на акустические и электрические свойства мерзлых засоленных грунтов// Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. № 6, 2019;
- 2) Котов П.И., Агапкин И.А. Корреляция между геофизическими параметрами и прочностными характеристиками мерзлых грунтов различной засоленности // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2021. – № 1. – С. 14-19;
- 3) Котов П.И., Агапкин И.А., Владов М.Л., Жусупбеков А.Ж. Обзор корреляционных зависимостей между сейсмоакустическими и

геотехническими характеристиками мерзлых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2023. — №2-2023 27-32 стр.

Публикации в иных научных изданиях:

- 1) Agapkin I., Kotov P., Koshurnikov A. (2018) Geophysical methods for assessing physical and mechanical properties of frozen soils // Students in Polar and Alpine Research Conference, Brno, Czech republic, April 16-18;
- 2) Agapkin I., Kotov P., Koshurnikov A. (2018) Application of geophysical methods to estimate mechanical properties of frozen saline soils (based on experimental data) // 5th European conference on permafrost, Chamonix, France, June 23-July;
- 3) Agapkin I., Kotov P. (2018) Geophysical methods for determination properties of frozen soils // 7th International Scientific Conference of young scientists and students on "Information technologies in solving modern problems of geology and geophysics", Baku, Azerbaijan, October 15-18l;
- 4) Agapkin I.A., Kotov P.I. Velocities of longitudinal waves in frozen saline soils // 6th scientific conference "Tyumen 2019", Tyumen, Russia, 25-29 of march, 2019;
- 5) Agapkin I.A., Kotov P.I. The relationship between the electrical and strength properties of frozen saline soils// L.L. Perchuk International School of Earth Sciences, I.S.E.S – 2020, September 11-15, Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia, 2020, p.64;
- 6) Агапкин И.А., Котов П.И. Взаимосвязь между скоростью продольных волн и эквивалентным сцеплением мерзлых засоленных грунтов// Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 28-30 сентября, Якутск, Россий, 2020г. Якутск.: ИМЗ СО РАН, с.350-354;
- 7) Agapkin I.A., Kotov P.I. and Kal'bergenov R.G. Determination of Unfrozen Water Content in Frozen Soils by The Acoustic Method European // Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Tyumen 2021, March 2021, Volume 2021, p.1 – 6;

- 8) Agapkin I.A., Kotov P.I. Determination State of Frozen Saline Soils by Geophysical Methods // European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Tyumen 2021, March 2021, Volume 2021, p.1 – 6;
- 9) Агапкин И.А., Котов П.И. Электрические свойства для оценки физико-механических свойств мерзлых грунтов. // ГеоЕвразия 2021, 2021, Том 2, с.329-332;
- 10) Агапкин И.А. Прогноз свойств мерзлых засоленных грунтов по данным электрических и акустических исследований // Ломоносов-2021, Москва, Россия, 2021;
- 11) Агапкин И.А., Котов П.И. Определение свойств мерзлых засоленных грунтов по данным электрических и акустических исследований // Сборник тезисов международной конференции "Инженерно-геокриологические исследования", 22-23 января, Звенигород, Россия, 2022, с.7-8. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1214-3-2022-86;
- 12) Агапкин, И. А. Применение геофизических методов для оценки физико-механических свойств мерзлых засоленных грунтов / И.А. Агапкин, П.И. Котов // Мониторинг в криолитозоне : Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов, Москва, 14–17 июня 2022 года / Под редакцией Р.Г. Мотенко. – М.: "КДУ", "Добросвет", 2022. – С. 966-968. – EDN NUUTTW.