

**Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева  
Российской академии наук**

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
Кандидат геолого-минералогических наук  
Сергеев Дмитрий Олегович

Москва – 2025

## Оглавление

<i>Введение.....</i>	3
<i>Глава 1. Анализ возможности применения геофизических методов для оценки физико-механических свойств мерзлых засоленных грунтов.....</i>	14
1.1 Распространение и особенности свойств мерзлых засоленных грунтов ....	14
1.2 Расчеты несущей способности и деформаций мерзлых засоленных грунтов .....	20
1.3 Применение геофизических методов для оценки свойств мерзлых грунтов .....	24
<i>Глава 2. Методика экспериментальных исследований .....</i>	50
2.1 Характеристики грунтов нарушенного сложения.....	50
2.2 Планирование экспериментов и подготовка образцов .....	51
2.3 Определение электрических и акустических характеристик грунтов .....	55
2.4. Испытания шариковым штампом .....	60
2.5. Определение температуры начала замерзания .....	62
2.6 Определения содержания незамерзшей воды .....	66
2.7 Статистическая обработка данных .....	68
<i>Глава 3. Результаты экспериментальных исследований .....</i>	69
3.1 Механические свойства мерзлых засоленных грунтов.....	69
3.2 Электрические и акустические свойства мерзлых засоленных грунтов.....	74
3.3 Влияние засоленности на удельное электрическое сопротивление и скорость продольных волн.....	77
3.4 Оценка величины эквивалентного сцепления мерзлых засоленных грунтов на основе измерений удельного электрического сопротивления .....	84
3.5 Оценка мерзлого и талого состояния мерзлых засоленных грунтов по данным геофизических измерений .....	93
3.6. Оценка содержания незамерзшей воды мерзлых засоленных грунтов по результатам определения акустических свойств.....	96
3.7 Возможность применения разработанных методик при инженерно-геологических изысканиях.....	99
<i>Основные выводы работы.....</i>	104
<i>Список литературы.....</i>	106
<i>Список рисунков, приведенных в основном тексте работы .....</i>	118
<i>Список таблиц, приведенных в основном тексте работы.....</i>	121

## Введение

Применение геофизических методов исследования позволяет получать данные о структуре геологического массива как в пространственном, так и в временном аспектах. Для этого разработано множество методов, которые в настоящее время успешно используются (Хмелевской, 1994).

Геофизические исследования широко применяются в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Обычно их используют для решения таких задач, как оценка глубины сезонно-талого слоя, определение мощности и конфигурации многолетнемерзлых грунтов, а также оконтуривание таликов или залежей пластовых льдов в разрезе (Kneisel et al., 2008). Установлено, что некоторые геофизические параметры имеют хорошую корреляцию с физическими и механическими свойствами мерзлых грунтов (Fortier, 1994). Это позволяет разрабатывать методики для определения этих свойств с помощью геофизических исследований (Рекомендации, 1989; Фролов 2005). Такой подход позволяет значительно сэкономить время и стоимость исследований, а также дает возможность изучать массив в естественном залегании, при этом важно отметить, что он является косвенным и менее точным по сравнению с прямыми лабораторными или полевыми испытаниями. Разработка комплексного подхода по применению геофизических методов для оценки физико-механических свойств мерзлого массива потенциально может позволить создать систему мониторинга за изменением его физического и напряженно-деформационного состояний.

При изучении многолетнемерзлых грунтов с использованием геофизических методов наибольшее распространение получили электrorазведочные и сейсмоакустические исследования (Carcione, 1998). Это объясняется тем, что именно при замерзании резко меняются физические свойства грунтов, а вместе с ними и значения удельного электрического сопротивления (УЭС), скорости продольных и поперечных волн. Также в

практике существуют примеры применения методов георадиолокации и радиоизотопных методов для оценки физических свойств мерзлых грунтов.

С середины XX века исследователи начали проводить как лабораторные, так и натурные опыты для оценки физико-механических свойств мерзлых пород с помощью геофизических методов. Среди них можно выделить как российских ученых, так и зарубежных: Аптикаев Ф.Ф. (1964), Баулин Ю.И. (1971), Боголюбов А.Н. (1976), Жесткова Т.Н. (1982), Зыков Д.Ю. (1983, 1989, 1992, 2007), Фролов А.Д (1972, 2005)., Хмелевской В.К. (1989), Червинская О.П. (1979), Muller G. (1990), Shen ZY. (1994), Timur A. (1968), Nakano (1972), Yang P. (1997) и другие. Несмотря на исследования в этой области, разработки не нашли широкого применения в практике.

Мерзлые грунты могут быть представлены скальными (изверженными, метаморфическими, осадочными) и дисперсными (песчаными, глинистыми), органическими и органно-минеральными (торфа) грунтами.

Скальные грунты являются надежными грунтами оснований для инженерных сооружений, характеризующиеся высокой прочностью и низкой деформируемостью. Основными проблемами является трещиноватость массива и заполнение пустот льдом, что в значительной степени влияет на механические свойства. При этом для этих грунтов получены достаточно четкие зависимости механических свойств от сейсмоакустических параметров, как для мерзлых, так и для талых грунтов, зависящие только от неоднородности массива (Воронков, 2008; Воронков 2009). В настоящее время широко применяются методы сейсмо и электротомографии для мониторинга в Альпах (Hauck, 2011; Magnin, 2015; Keuschnig, 2016).

Торфа очень редко используют в качестве грунтов оснований, при строительстве их обычно убирают или заменяют песком (Роман, 1987).

Наиболее сложными для изучения являются дисперсные грунты (песчаные и глинистые), которые часто являются грунтами оснований инженерных сооружений в криолитозоне. Дисперсные мерзлые грунты — это многокомпонентные системы, состоящие из твердых частиц, незамерзшей

воды, льда, газов. Пропорциональность этих компонентов определяет их физико-механические и физические свойства.

Установлено, что засоленные мерзлые грунты представляют собой среды, существенно отличающиеся от незасоленных по деформируемости, а следовательно, по упругости и прочности, что определяется особыми условиями их формирования и эволюцией пространственной кристалло-коагуляционной структуры (Chervinskaya et al., 1998).

Теоретическое моделирование свойств мерзлых грунтов представляет собой сложную задачу из-за их многокомпонентного состава. Вследствие этого, большая часть исследований механических свойств мерзлых грунтов основывается на полевых и лабораторных экспериментах. Наиболее распространенным подходом является установление парных зависимостей между различными характеристиками, которые могут иметь как функциональный (причинно-следственный), так и стохастический (корреляционный) характер. Несмотря на то, что эти зависимости могут быть достаточно тесными, для их практического применения требуется дополнительная проверка и корректировка для каждого конкретного случая (Park, 2013; Huang, 2013).

Многопараметрические зависимости, принимающие во внимание изменения всех ключевых характеристик состава, структуры и состояния мерзлых грунтов, обладают большей универсальностью (Зыков, 2007).

В настоящее время отсутствуют единые теоретические модели, объясняющие поведение мерзлых грунтов. Это обусловлено разрозненностью большинства исследований, вызванной значительным разнообразием применяемых методов и характеристик исследуемых грунтов. Тем не менее, многие ученые установили взаимосвязь между геофизическими данными и свойствами мерзлых грунтов (Зыков, Червинская, Фролов, Huang, Li и другие). Для развития теоретической базы необходимы систематичные исследования, направленные на изучение корреляционных зависимостей.

Для практического применения и численной реализации модели должны включать как можно меньше параметров. Модели для мерзлых засоленных грунтов будут дополнительно усложнены наличием параметра засоленности, при этом моделирование процессов промерзания-оттаивания даже в незасоленных породах является сложным в силу нелинейности уравнений тепло-и массопереноса при наличии фазовых переходов (Комаров, 2022).

Создание единой базы данных, содержащей систематизированную информацию о механических свойствах мерзлых грунтов, может оптимизировать процесс валидации моделей и стимулировать дальнейшие исследования в области механики мерзлых грунтов (Li et al., 2024).

Оценочные модели, основанные на корреляции свойств грунта с результатами геофизических измерений, могут стать практическим решением для задач строительства и мониторинга в зонах распространения мерзлых пород.

Особую значимость приобретает освоение прибрежных арктических территорий, где широко распространены мерзлые засоленные грунты (Аксенов, 2008; Комаров, 2018). В этих регионах, помимо добычи ресурсов, осуществляется строительство стратегически важных объектов в виде портовой инфраструктуры и транспортных развязок.

## **Актуальность работы.**

Интенсивное освоение прибрежных территорий Арктики требует разработки современных технологий, которые помогут оптимизировать процессы строительства и мониторинга сооружений в области 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.**

Для определения корреляционных зависимостей между физико-механическими и геофизическими свойствами 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 на каждой изучаемой температуре.

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

**Практическая значение работы.** Разработанные методики направлены на потенциальное сокращение 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.** 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.

## **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 °С изменение 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 образца 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 (Брюно, Чехия, 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, 3 глав, заключения, списка литературы общим объемом 121 страницу. Диссертация содержит 33 рисунка и 10 таблиц. Список использованной литературы включает 114 наименований.

Статьи в рецензируемых научных издания:

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.

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.

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. – С. 27-32.

Конференции:

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.

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.

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 15-18.

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.

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.

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.

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.

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.

Агапкин И.А., Котов П.И. Электрические свойства для оценки физико-механических свойств мерзлых грунтов. // ГеоЕвразия 2021, 2021, Том 2, с.329-332.

Агапкин И.А. Прогноз свойств мерзлых засоленных грунтов по данным электрических и акустических исследований // Ломоносов-2021, Москва, Россия, 2021.

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.

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.

**Благодарности.**

Автор выражает искреннюю и глубокую благодарность своему научному руководителю к.г-м.н. Д.О. Сергееву 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 при выполнении работы.

## **Глава 1. Анализ возможности применения геофизических методов для оценки физико-механических свойств мерзлых засоленных грунтов**

### **1.1 Распространение и особенности свойств мерзлых засоленных грунтов**

Наибольший интерес при рассмотрении засоленных пород в криолитозоне представляет их площадное распространение и залегание в верхних горизонтах (до глубины 15 метров), где происходит активное взаимодействие с инженерными сооружениями и протекают различные криогенные процессы.

Засоленные мерзлые четвертичные породы Арктического побережья, распространенные с поверхности, имеют различное происхождение с преобладанием, однако, морских и прибрежно-морских условий образования. При быстром промерзании горных пород соли в основном перераспределяются внутри образующихся толщ, а также частично выносятся за их пределы.

Общая схема районирования засоленных мерзлых пород в Северном полушарии по данным А.В. Брушкова представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Схема распространение засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии в зависимости от морского (черный) и континентального (серый) типов засоления (Брушков, 1998).

Таким образом, образование засоленных мерзлых пород на арктическом побережье происходит в результате одновременного и последовательного промерзания (синкриогенного и эпикриогенного) морских отложений, в поровом растворе которых присутствуют растворимые в воде соли. Основные физико-механические характеристики этих пород зависят от температурных условий, концентрации солей в поровом растворе и скорости накопления осадков на аккумулятивных берегах.

На рисунке 1.2 показаны схема распространения засоленных грунтов на Арктическом побережье России. Здесь выделяются два типа засоления — морской и континентальный, которые определяются химическим составом солей и существенно влияют на физико-механические свойства пород. Условия современного распространения мерзлых пород с морским и континентальным засолением подробно рассматриваются во многих исследованиях. Далее автор сосредоточится на сжатом обзоре исследования Г.И. Дубикова и Н. В. Ивановой (1990).

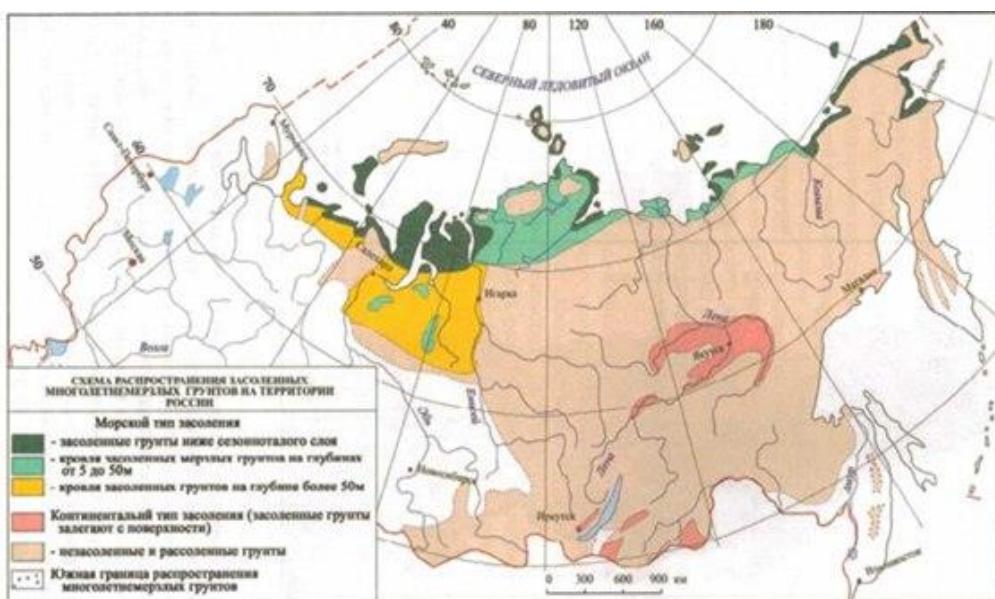


Рисунок 1.2. Схема – карта распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов на территории России (Аксенов, 2008).

Химический состав солей в поровой воде засоленных пород криогенной толщи варьируется в разных районах, но эти различия остаются

стабильными на больших территориях. Процессы образования многолетней мерзлоты обуславливают два основных типа засоления осадочных пород. Морское засоление, характерное для арктического побережья, сформировалось благодаря наследию плейстоценовых морских трансгрессий, которые оставили после себя соленые иловые осадки. В дальнейшем на распределение солей повлияли процессы диагенеза и рассоления при периодическом оттаивании пород. Континентальное засоление распространено во внутриматериковых районах, таких как Центральная Якутия, Забайкалье, Тибетское плато (Kezao, 1986) и Монголия (Лискун, 1975). Промерзание и оттаивание морских пород сопровождались разделением солей между жидкой и твердой фазами, а также изменением концентрации поровых растворов во время кристаллизации и таяния льда. При замерзании поровой воды часть солей включалась в ледяные кристаллы, часть выпадала в осадок, а часть выдавливалась в подстилающие горизонты. Оттаивание мерзлых массивов приводило к рассолению фильтрующимися поверхностными и грунтовыми водами и неполному растворению осевших солей.

Формирование континентального типа засоления происходило в аридных условиях, для которых характерны высокие летние температуры и отрицательный водный баланс. Данный климатический режим вызывал интенсивное испарение, что в течение длительного периода осадконакопления и последующего промерзания приводило к аккумуляции солей в верхних горизонтах пород.

Также на территории северных городов (Норильск, Якутск, Воркута) наблюдается активное техногенное засоление поверхностного слоя грунтов (Павлова, 2018).

Содержание растворимых солей в составе промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов, даже в незначительном количестве (от сотых долей %), существенно влияет на их физические и механические свойства. Наличие растворимых солей в поровой воде грунта оказывает комплексное влияние на

его физические и механические характеристики. Прежде всего, солевые растворы понижают температуру замерзания, в результате чего грунты, имеющие отрицательную температуру, могут длительное время находиться в охлажденном, но немерзлом состоянии. Даже когда температура опускается ниже новой точки замерзания, в засоленных грунтах сохраняется значительно более высокое содержание незамерзшей воды по сравнению с их незасоленными аналогами. Интенсивность этих процессов зависит не только от общей концентрации солей в поровых растворах, но и от их химического состава. Совокупное воздействие этих факторов приводит к существенному изменению реологических свойств грунта. Проявляется это в виде снижения прочности, усиления ползучести и увеличения скорости деформации во времени под действием внешних нагрузок.

В конечном итоге, засоленные грунты имеют более низкую несущую способность в качестве основания сооружений. Поэтому установление закономерностей формирования физико-механических свойств мерзлых засоленных грунтов является важной не только теоретической, но, прежде всего, практической задачей.

В 1958 г. отечественные ученые Ю.Л. Велли и П.А. Гришин (1963) первыми обратили внимание на роль засоления мерзлых грунтов. При обследовании зданий в арктическом поселке Амдерма они отметили, что пониженная несущая способность фундаментов зданий, возведенных на мерзлых грунтах, связана с засолением. Начатые в те же годы исследования прочностных и деформационных свойств засоленных мерзлых грунтов позволили внести тогда некоторые рекомендации в Нормы (СНиП II -Б.6-66) по учету специфических свойств засоленных мерзлых грунтов.

В 1970–1980-е годы осуществлялись специализированные комплексные исследования прочностных, деформационных, теплофизических, водно-физических и химических характеристик засоленных мерзлых грунтов. В эти годы получили известность работы В.М. Карпова, Ю.Я. Велли, В.Н. Иванова, П.А. Гришина, Ю.М. Макова, Я.А. Кроника, Б.И.

Далматова, Н.А. Цытовича и др. Так как ранее считавшиеся малопригодными площадки застраивались все чаще, становилась все более актуальной необходимость исследования свойств засоленных грунтов на таких площадках.

В 80-х годах прошли защиты нескольких диссертаций, посвященных изучению прочностных свойств засоленных мерзлых грунтов (Карпунина, 1974; Аксенов, 1980; Яркин, 1986). Результаты этих исследований также были использованы при составлении последующих нормативных документов, в частности, СНиП 2.02.04-88, действующего с 1988 года до 2013 года. В свою очередь, с 1 января 2013 года был введен СП 25.13330.2012, утвержденный приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 29 декабря 2011 года № 622.

В период с 1990 по 2010 гг. больше всего внимания уделялась исследованиям мерзлых засоленных грунтов на кафедре геокриологии Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Под руководством Л.Т. Роман было выполнено несколько диссертационных работ, посвященных изучению закономерностей влияния засоленности на прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов, а также методам их прогноза (Свинтицкая, 1997; Иванова, 1997; Веретехина, 2002; Кривов, 2009). Под руководством профессора Э.Д. Ершова был выполнен цикл исследований свойств засоленных грунтов, получивших отражение в успешно защищенных кандидатских диссертациях. В рамках этого научного направления Н.С. Налетова (1996) изучила процессы массопереноса в промерзающих засоленных породах, а Р.Г. Мотенко (1997) исследовала их теплофизические свойства и фазовый состав влаги. Параллельно с исследованием свойств засоленных мерзлых грунтов изучались их происхождение и распространение. Определенным обобщением предшествующих работ по исследованию свойств и распространения засоленных мерзлых грунтов явилась работа А.В. Брушкова «Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства» (1998). На основе выполненных исследований

были внесены поправки в действующие нормативные документы и выпущен новый СП 25.13330.2012. Обновленная версия СП 25.13330.2020 была выпущена в 2021г.

Проблема изучения свойств засоленных мерзлых грунтов привлекла внимание зарубежных исследователей в 70-х годах, когда при проектировании искусственных островов в море Бофорта столкнулись с недостаточной несущей способностью засоленного мерзлого песка. К исследованиям в Канаде, проведенным D. Sego (1982) и G. Pharr (1985), подтолкнула практическая потребность в возведении фундаментов в Арктике (Nixon, 1988). В работе J. Nixon (1984) было определено, что деформации засоленных мерзлых грунтов могут возрастать в 10 и даже в 100 раз при изменении концентрации порового раствора в диапазоне от 0 до 30 промилле (ppt). Исследования, проведённые в США и Канаде (Pharr (1985), Sego (1984), Aas (1980), Hivon (1991, 1993, 1995)), характеризуются меньшим объемом экспериментальных данных, однако демонстрируют значительную направленность на получение обоснованных эмпирических зависимостей, позволяющих прогнозировать прочностные и деформационные характеристики засоленных мерзлых грунтов.

В Китае исследованиями засоленных грунтов начали активно заниматься с конца 90-х начало 2000 годов в связи с активным развитием строительства в районе на северо-западе Китая, в зоне прохождения Цинхай-Тибетской железной и автомобильной дороги (Lai, 2013). Китайскими учеными получены новые результаты физических и механических свойств мерзлых засоленных грунтов в этом районе, получены эмпирические зависимости механических свойств от засоленности (Yang et al., 2006; 2008).

В Гренландии с помощью электроразведки исследовались многолетнемерзлые засоленные грунты (Ingeman-Nielsen, 2008).

В западных регионах вечной мерзлоты Китая широко распространены грунты с сульфатным типом засоления (Xu et al., 1995). В связи с этим с 2010 годов начинается активное изучение влияния сульфатного засоления на

прочностные и деформационные свойства грунтов (Wan, 2013; 2015; Liao, 2016). В последнее время китайские ученые на основе законов термодинамики и кинетики кристаллизации предложили термо-гидромеханические модели засоленных грунтов (Lai, 2016; 2021; Wu, 2017)

Таким образом, на основе выполненного анализа литературы можно сделать следующие выводы:

1. Исследование засоленных грунтов является актуальной темой для многих стран;
2. В Арктике наибольшее распространение имеет морской тип засоления;
3. Засоленность оказывает значительное влияние на физические и механические свойства мерзлых грунтов.

## **1.2 Расчеты несущей способности и деформаций мерзлых засоленных грунтов**

Засоленные многолетнемерзлые грунты применимы в качестве оснований сооружений по обоим принципам: I (с сохранением грунта в мерзлом состоянии) и II (с допущением его оттаивания). Критическим фактором в обоих случаях является учет их повышенной агрессивности по отношению к материалу фундаментов.

Требования СП 25.13330.2020 предписывают для таких условий применять конструкции фундаментов, позволяющие максимально реализовать несущую способность мерзлого грунта при нормальном давлении. К ним относятся плитные, ленточные, столбчатые фундаменты, а также сваи с уширенной пятой. При буроопускном способе монтажа свай регламентируется устройство скважин с диаметром, превышающим сечение сваи минимум на 10 см, с последующим заполнением полости известково-

песчаным или цементно-песчаным раствором. Под пятой сваи необходимо устраивать уплотненную щебеночную подготовку.

Согласно указанному своду правил, расчет несущей способности оснований столбчатых и свайных фундаментов на засоленных многолетнемерзлых грунтах при использовании по принципу I должен выполняться исходя из условия...

$$F \leq F_u / \gamma_n, \quad (1.1)$$

где  $F$  — расчетная нагрузка на основание;  $F_u$  — несущая способность основания, определяемая расчетом (1.2), а для оснований свайных фундаментов — дополнительно и по данным полевых испытаний свай и статического зондирования;  $\gamma_n$  — коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый в соответствии в зависимости от вида и уровня ответственности сооружения.

Несущая способность основания  $F_u$ , кН, вертикально нагруженной висячей сваи или столбчатого фундамента определяется по формуле

$$F_u = \gamma_t \gamma_c (R A + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i}), \quad (1.2)$$

где  $\gamma_t$  — температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха;  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы основания;  $R$  — расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи или под подошвой столбчатого фундамента, кПа, определяется по формуле (1.3);  $A$  — площадь подошвы столбчатого фундамента или площадь опирания сваи на грунт,  $\text{м}^2$ , принимаемая для сплошных свай равной площади их поперечного сечения (или площади уширения), для полых свай, погруженных с открытым нижним концом, — площади поперечного сечения сваи брутто при заполнении ее полости цементно-песчаным раствором или грунтом на высоту не менее трех диаметров сваи;  $R_{af,i}$  — расчетное сопротивление мерзлого грунта или

грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи или столбчатого фундамента в пределах ( $i$ -го слоя грунта, кПа);  $A_{af,i}$  — площадь поверхности смерзания  $i$ -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, а для столбчатого фундамента — площадь поверхности смерзания грунта с нижней ступенью фундамента,  $\text{м}^2$ ;  $n$  - число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта.

Расчетное давление на мерзлый грунт под подошвой фундамента  $R$  и расчетные сопротивления мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по поверхности смерзания фундамента  $R_{af}$  устанавливаются по данным испытаний грунтов, проводимых в соответствии с ГОСТ 12248.8-2020, с учетом коэффициента надежности по грунту  $\gamma_g$  и расчетных температур грунта основания, определяемых теплотехническим расчетом.

По результатам испытаний грунтов шариковым штампом или на одноосное сжатие расчетные значения  $R$ , кПа, вычисляются по формуле:

$$R = 5,7c_n/\gamma_g + \gamma_i d, \quad (1.3)$$

где  $c_n$  — нормативное значение предельно длительного сцепления, кПа, принимаемое равным:  $c_n = c_{egn}$  при испытаниях грунтов шариковым штампом и  $c_n = 0,5R_{cn}$  — при испытаниях на одноосное сжатие, где  $c_{egn}$  и  $R_{cn}$  — соответственно предельно длительное эквивалентное сцепление и сопротивление грунта одноосному сжатию;  $\gamma_i$  — расчетное значение удельного веса грунта,  $\text{kH/m}^3$ ;  $d$  — глубина заложения фундамента, м;  $\gamma_g$  — коэффициент надежности по грунту.

При этом расчетные значения сопротивления грунтов нормальному давлению и сдвигу по поверхности смерзания  $R$  и  $R_{af}$  надлежит принимать, как правило, по опытным данным.

Расчет оснований и фундаментов на засоленных многолетнемерзлых грунтах по деформациям следует производить исходя из условия

$$s_f \leq s_u, \quad (1.4)$$

где  $s_f$  — деформация пластично-мерзлого основания под нагрузкой от сооружения;  $s_u$  — предельно допустимая деформация основания сооружения за расчетный срок его эксплуатации (табличное значение определяется согласно СП 22.13330 в зависимости от типа сооружения).

Осадки оснований фундаментов, возводимых на пластично-мерзлых грунтах, определяют:

- а) для столбчатых фундаментов — применяя расчетную схему в виде линейно-деформируемого полупространства или линейно-деформируемого слоя конечной толщины;

Осадку основания фундамента с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства определяют методом послойного суммирования по формуле

$$s = b \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zg,i})h_i}{E_i}, \quad (1.5)$$

где  $b$  — безразмерный коэффициент, равный 0,8;  $\sigma_{zp,i}$  — среднее значение вертикального нормального напряжения (далее - вертикальное напряжение) от внешней нагрузки в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа;  $h_i$  — толщина  $i$ -го слоя грунта, см, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;  $E_i$  — модуль деформации  $i$ -го слоя грунта, кПа;  $\sigma_{zg,i}$  — среднее значение вертикального напряжения в  $i$ -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, от собственного веса выбранного при отрывке котлована грунта, кПа;  $n$  — число слоев, на которые разбита сжимаемая толща основания.

При этом для разных методов расчета необходимо определить расчетные деформационные характеристики пластично-мерзлых грунтов (коэффициент сжимаемости или модуль деформации), который

рассчитывается по данным компрессионных испытаний в соответствии с ГОСТ 12248.10 при расчетной температуре грунта.

Таким образом, для расчета несущей способности и деформаций сооружения необходимо проведение следующего минимального комплекса испытаний для каждого инженерно-геологического элемента: шариковый штамп, сдвиг по поверхности смерзания и компрессионные испытания. При этом последние два испытания являются достаточно трудоемкими и могут продолжаться месяц, а шариковый штамп является экспресс методом и поэтому наиболее часто используется в практике инженерных изысканий. При этом по данным шарикового штампа возможно рассчитать и модуль деформации (Роман, 2018). В связи с этим именно этот метод был выбран основным для данных исследований.

### **1.3 Применение геофизических методов для оценки свойств мерзлых грунтов**

#### ***Сейсмоакустические методы***

Использование сейсмоакустических методов для оценки физико-механических свойств грунтов проводится в основном в лабораторных условиях. Ультразвуковые измерения позволяют определить упругие и поглощающие свойства, как талых, так и мерзлых образцов грунта. Такие исследования дают возможность изучать анизотропию сейсмических характеристик, а также их связь с физико-механическим свойствами, составом и состоянием пород.

Сейсмоакустические методы используются для определения динамических упругих параметров на основе существующих теоретических связей между скоростями упругих волн с одной стороны и динамическими

коэффициентами Пуассона и модулем Юнга – с другой (Wang, 2006; Christ, 2009).

Среди ультразвуковых исследований выделяют два основных: импульсный и резонансный.

Резонансный метод используют только при измерениях на образцах. Суть метода заключается в возбуждении упругих волн различных типов в образцах правильной формы и измерении частоты собственных колебаний. По измеренным частотам можно определить такие упругие параметры, как модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и скорости упругих волн. Резонансный метод довольно трудоемкий и ограниченный, поэтому довольно редко применяется с целью решения инженерно- геологических задач.

Большую распространенность получил импульсный метод, так как его можно применить и при измерениях на образцах и при ультразвуковом моделировании. При импульсном методе измеряется время распространения упругих колебаний на участке известной длины (например, высоты образца). Выделяются сейсмические, акустические и ультразвуковые методы в зависимости от частоты исследуемых колебаний. Исследования проводятся с помощью дефектоскопов, в качестве источника возбуждения и приемника используются обычно пьезоэлектрические датчики (Ошкин, 2008).

### *Методы электроразведки*

Электроразведка позволяет решать такие геокриологические задачи, как картирование боковых границ мерзлых пород, картирование охлажденных пород и криопэгов, картирование сильно-льдистых пород и повторно жильных льдов, определение кровли мерзлых пород, а также по определяемым электрическим характеристикам возможна косвенная оценка физико-механических свойств исследуемых мерзлых грунтов.

Горные породы в мерзлом состоянии представляют собой несовершенные диэлектрики, при этом их основными характеристиками

являются удельное электрическое сопротивление, обратная ей величина удельная электропроводность, диэлектрическая проницаемость и коэффициент поляризуемости.

При изучении мерзлых грунтов обычно используются методы, основанные на постоянном токе, при этом главным параметром пород является удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , имеющие размерность Ом·м.

Основным фактором, определяющим удельное электрическое сопротивление, является соотношение компонентов, слагающих горную породу, их относительный объем и пространственное расположение. Удельное электрическое сопротивление всех типов горных пород, включая мерзлые, подчиняется логнормальному закону распределения (Хмелевской, 1994).

Исследования удельного электрического сопротивления мерзлых грунтов начались еще в конце первой половины прошлого века. На сегодняшний день установлены закономерности влияния литологического состава, температуры, плотности, содержания незамерзшей воды и засоленности на электрическое сопротивление (Shang, 2015). Например, с понижением температуры удельное электрическое сопротивление увеличивается, причем начальная температура, при которой начинается рост сопротивления, зависит от температуры начала замерзания порового раствора. Также установлено, что сопротивление засоленных мерзлых грунтов имеет обратно пропорциональную зависимость с концентрацией порового раствора. Кроме того, грунты с разной засоленностью в мерзлом состоянии значительно различимы по значениям удельного электрического сопротивления по сравнению с талыми (Зыков, 1992).

### ***Физические свойства***

Физические характеристики мерзлых грунтов, такие как гранулометрический состав, льдистость, влажность, плотность, криогенная

текстура, содержание незамерзшей воды в совокупности определяют мерзлый массив, задавая его прочность и определяя дальнейшую методику исследования и последующую инженерную эксплуатацию. Большинство из этих характеристик определяются лабораторными испытаниями в соответствии с ГОСТ 5180-2015. Такой подход позволяет выполнить измерения с высокой точностью, однако, он требует значительных временных затрат, а также не позволяет изучать эти свойства непосредственно в самом массиве. Многие из этих характеристик возможно также оценить с помощью геофизических методов.

### *Гранулометрический состав*

Гранулометрический состав обычно определяется лабораторными методами: ситовым или же с помощью ареометра. Радиоизотопный метод не позволяет полностью определить гранулометрический состав, но дает возможность определить содержание глинистых частиц, так называемую глинистость. Очевидным достоинством радиоизотопных методов является то, что они позволяют изучать свойства мерзлых грунтов в естественном залегании.

Количество глинистых частиц определяется путем измерения интенсивности потока гамма-излучения, исходящего от грунта. Принцип метода базируется на установленной корреляции между концентрацией естественных радиоактивных элементов в грунте и процентным содержанием в нем глинистой фракции (Рекомендации, 1989).

### *Плотность*

Для прямого измерения плотности мерзлого грунта в ненарушенном состоянии разработан ряд радиоизотопных методов.

Просвечивание: Оценка плотности осуществляется по степени ослабления потока гамма-квантов, прошедших через грунтовый массив.

Рассеянное гамма-излучение: Плотность определяется по интенсивности вторичного (рассеянного) излучения, возникающего при облучении грунта.

Нейтронный метод используется для оценки объемной влажности, опираясь на процесс замедления быстрых нейтронов ядрами элементов грунта, который напрямую коррелирует с концентрацией водорода, а значит, и с влажностью. (Рекомендации, 1989).

### *Коэффициент пористости*

Jarvis и Knight (2002) изучали взаимоотношение коэффициента пористости ( $e$ ) и скорости поперечных волн. Для мерзлых песчаных образцов было получено уравнение, зависящее от скорости поперечных волн ( $V_s$ ) и ограничивающего давления давления ( $\sigma$ )

$$e = 2,6 - \frac{V_s}{37\sigma^{1/4}} \quad (\text{Jarvis et al., 2002}). \quad (1.6)$$

### *Влажность*

Объемная влажность  $W_o$  дисперсного мерзлого грунта устанавливается с помощью метода рассеянного нейтронного излучения (нейтронного метода). В его основе лежат два физических явления: замедление быстрых нейтронов при столкновении с атомными ядрами, преимущественно водорода, и установленная зависимость между концентрацией водорода в среде и ее влажностью. Практическая реализация метода заключается в измерении

интенсивности потока замедленных нейтронов Nw (тепловых и надтепловых) (Рекомендации, 1989).

Что касается георадарных исследований, специалисты ВСЕГИНГЕО заявляют о выявленной в зоне аэрации корреляции между скоростью распространения радиоволн и влажностью грунтов. Однако в представленной работе (Нерадовский, 2016) отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие эту зависимость.

В работах Нерадовского была предпринята попытка использования метода георадиолокации для оценки суммарной влажности/льдистости мерзлых дисперсных грунтов. Для грунтов Центрально-Якутской равнины было получено уравнение множественной линейной регрессии, связывающее суммарную весовую влажность мерзлых грунтов со скоростью распространения и затухания георадарных сигналов:

$$W_{\text{tot}} = -47,9 + 815,3 \cdot V - 7,14 \cdot G; R^2 = 0,58, \quad (1.7)$$

где V и G — скорости распространения и затухания сигналов георадиолокации соответственно.

Полученное уравнение применимо только к грунтам района исследований, а также не применимо к маловлажным пескам и ледогрунтам (Нерадовский, 2016).

Аналогичные исследования были выполнены для объемной влажности/льдистости на ледовом комплексе Лено-Амгинского междуречья Центрально-Якутской равнины. Хотя при значениях суммарной влажности  $W_{\text{tot}} > (70-80) \%$  скорость и затухание георадарных сигналов перестают быть информативным показателем льдистости, данное ограничение практически не сказывается на точности определения  $W_{\text{tot}}$  с помощью регрессионных уравнений:

$$W_{\text{tot}} = 35,35 + 9,859E12 / (1 + 3,41E14 \cdot \exp(-43,89 \cdot V)), R^2 = 0,571, \quad (1.8)$$

$$W_{\text{tot}} = 1426 - 1403 / (1 + 0,05645 \cdot \exp(-0,7369 \cdot G)), R^2 = 0,829. \quad (1.9)$$

Проверка на фактическом материале исследований показала, что по отношению к лабораторным данным уравнения (1.8), (1.9) равновероятно завышают-занижают значения  $W_{\text{tot}}$  с нулевой средней ошибкой и в 70 случаях дают разброс частных ошибок  $\pm 10,5$  и  $\pm 6,5$  % (Нерадовский, 2016).

### *Льдистость и криогенная текстура*

Комплексная интерпретация данных вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электрокаротажа дает возможность оценить криогенную текстуру и льдистость мерзлых грунтов. ВЭЗ предоставляет информацию об удельном электрическом сопротивлении ( $\rho_m$ , Ом·м), в то время как электрокаротаж, выполняемый потенциал-зондом, позволяет определить величину продольного УЭС ( $\rho_t$ , Ом·м). Анизотропия удельного электрического сопротивления диагностируется по расхождению значений  $\rho_m$  и  $\rho_t$ , а ее количественной мерой служит коэффициент анизотропии, вычисляемый как  $\lambda = \rho_m / \rho_t$ .

Льдистость также поддается количественной оценке методами электrorазведки. С этой целью были разработаны номограммы, построенные на основе теоретических моделей мерзлых грунтов. Для работы с ними необходимы данные о продольном, поперечном и квадратичном УЭС (рис. 1). Каждая номограмма применяется для конкретного типа криогенной текстуры при известных составе грунта и его температуре. Качественная же интерпретация криотекстуры осуществляется в соответствии с табл. 1 (Рекомендации, 1989).

Таблица 1.1. Оценка криогенной текстуры при совместном использовании ВЭЗ и электрокаротажа (Рекомендации, 1989).

Значения $\rho_m$ , $\rho_t$ , Ом·м	$\lambda = 1$	$1 < \lambda < 10$	$\lambda \geq 10$
$\rho_m \geq 10^3$ $\rho_t \geq 10^3$	Равномерно-сетчатая	Слоисто-сетчатая	Слоистая
$\rho_m < 10^3$ $\rho_t < 10^3$	Массивная	Линзовидная	-

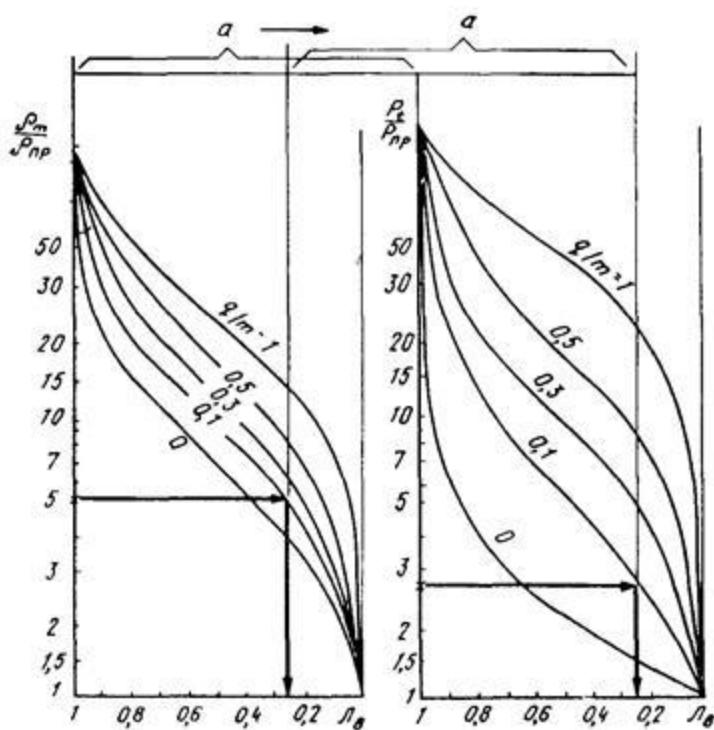


Рисунок 1.3. Ключ к номограммам определения льдистости ( $L_b$ ) по данным электроразведки (Рекомендации, 1989).

Сейсмоакустические методы также применимы для оценки криогенного строения и льдистости мерзлых грунтов. Количественной мерой анизотропии ( $\chi$ ) служит отношение скоростей распространения волн в горизонтальном и вертикальном направлениях. Проведенные исследования показывают, что максимальные значения коэффициента анизотропии характерны для грунтов со слоистой текстурой, в то время как в грунтах с массивной криогенной

текстурой анизотропия не наблюдается (Таблица 1.2). Равномерно-сетчатая текстура будет различаться с массивной условием  $W_{\text{tot}} > W_g$ , где  $W_{\text{tot}}$  — суммарная влажность, а  $W_g$  - влажность грунтовых прослоев, характерная для данной литологической разности.

Таблица 1.2. Криогенная текстура в зависимости от коэффициента анизотропии  
(Рекомендации, 1989).

коэффициент анизотропии	криогенная текстура
$\chi = 1$	массивная / равномерно-сетчатая
$\chi > 1$	горизонтально-слоистая
$\chi < 1$	вертикально-слоистая

В работе Dou (2017) исследовалась зависимость между скоростью продольных волн и льдистостью для мерзлых засоленных грунтов. В результате была построена модель количественной оценки льдистости в зависимости от скорости продольных волн и от отношения скорости продольных волн к поперечным.

### *Незамерзшая вода*

Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах служит ключевым параметром, формирующим их физико-химические и механические характеристики, а также регулирующим динамику геокриологических процессов (Роман, 2002). На сегодняшний день существует ряд лабораторных методик для ее количественного определения: контактный, сублимационный, калориметрический, метод ядерно-магнитного резонанса (Комаров, 2003), а также расчетные методы, основанные на изотермах адсорбции-десорбции (Чеверев, 2004) и потенциале влаги (Истомин, 2009). Поскольку большинство из этих способов характеризуются высокой трудоемкостью и значительными временными затратами, активно развиваются альтернативные подходы к оценке содержания незамерзшей воды с применением геофизических методов.

В 1994 году при изучении свойств мерзлых и оттаивающих грунтов Приуральского и Ямальского участков Байдарацкой губы полевой геотехнической лабораторией ПНИИИС была выведена расчетная формула определения содержания незамерзшей воды с помощью ультразвуковых измерений.

Определение скорости прохождения звука в образце грунта при промораживании отражает изменение фазового состава грунта — переход незамерзшей воды в лед. Исходя из этого, расчет количества незамерзшей воды по результатам определения скорости звука в дисперсной среде, производится по формуле:

$$W_w = W_{tot} - (V_{H(t=0)} - V_{(t=i)}) \frac{(W_{tot} - W_{g(t=-24)})}{(V_{H(t=0)} - V_{(t=-24)})}, \quad (1.10)$$

где  $W_w$  - количество незамерзшей воды, %;  $W_{tot}$  – суммарная влажность мерзлого образца, %;  $W_{g(t=-24)}$  - гигроскопическая влажность при  $t = -24$  °C;  $V_{H(t=0)}$  – скорость продольных волн  $t=0$  °C;  $V_{(t=i)}$  – скорость продольный волн при  $i$ -той температуре;  $V_{(t=-24)}$  – скорость продольных волн при  $t = -24$  °C.

Содержание незамерзшей воды является важной физической характеристикой, оказывающей прямое влияние на прочностные свойства мерзлых грунтов: чем больше содержание незамерзшей воды, чем ниже прочностные характеристики мерзлых грунтов (Agapkin, 2021).

В работе LI Dongqing (2016) рассматривается влияние содержания незамерзшей воды на скорости ультразвуковых волн в мерзлом грунте. По результатам работы на основе принципа эффективных напряжений было составлено акустическое волновое уравнение для трехфазного мерзлого грунта и в очередной раз подтвержден факт того, что скорости ультразвуковых волн увеличиваются с увеличением содержания льда. Новизна работы заключалась в том, что также было выведено уравнение, которое определяет изменение скорости продольных волн в зависимости от содержания

незамерзшей воды:

$$W_w = A V_p + B, \quad (1.11)$$

где  $W_w$  — содержание незамерзшей воды,  $V_p$  — скорость продольных волн, а  $A$  и  $B$  — эмпирические коэффициенты, которые зависят от типа грунта (Li dongqing, 2016).

Таким образом, содержание незамерзшей воды имеет хорошую связь с акустическими свойствами, при этом характеристики прочности мерзлых грунтов также имеют зависимость от содержания незамерзшей воды, которая в свою очередь зависит от температуры и типа грунта.

Также были предприняты попытки оценки количества незамерзшей влаги с помощью электроразведки. Многие исследователи пытались преобразовать Закон Арчи для мерзлых грунтов, чтобы выразить количество незамерзшей влаги через электропроводность. Одним из допущений этого закона является то, что электропроводность грунта зависит от электропроводности флюида и степени заполнения этим флюидом пор. В работе Dafflon с помощью закона Арчи количество незамерзшей влаги для дисперсных засоленных грунтов выражено с помощью уравнения:

$$W_w = \frac{\sigma_{wT_0}}{\sigma_{wT}} [1 - \beta(T_0 - T)], \quad (1.12)$$

где  $W_w$  — содержание незамерзшей воды,  $\sigma_{wT}$  — электропроводимость незамерзшей воды при начальной температуре  $T$ ,  $\sigma_{wT_0}$  — электропроводимость порового раствора в талом состоянии,  $\beta$  — эмпирический коэффициент, зависящий от температуры (Dafflon et al, 2016).

В исследовании Tang была предложена модель оценки содержания незамерзшей воды с помощью удельного электрического сопротивления. На пылеватых мерзлых грунтах было определено, что зависимость удельного сопротивления грунта и содержания незамерзшей воды в течение всех фаз

замерзания соответствует тренду степенной функции. Таким образом, модели удельного сопротивления были суммированы на протяжении всех фаз замерзания, и предложенная эквивалентная модель, которая отражает закон изменения удельного сопротивления в зависимости от содержания незамерзшей воды, была выражена в формуле:

$$\rho = m W_w^n, \quad (1.13)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление,  $m$  и  $n$  - эмпирические параметры, которые могут быть откалиброваны лабораторными испытаниями (Tang et al., 2018).

### ***Механические свойства***

Как уже было выше сказано, совокупность физических свойств влияет на механические свойства мерзлых дисперсных грунтов. В России испытания на механические свойства мерзлых дисперсных грунтов проводятся в соответствии с СП 25.13330.2020. Большинство экспериментов трудоемки и не позволяют изучить грунт непосредственно в массиве, к тому же некоторые измерения могут занимать по несколько недель. В следствии этого было предпринято множество различных попыток по применению геофизических методов для механических свойств мерзлых дисперсных грунтов.

### ***Динамический модуль упругости, динамический модуль сдвига и коэффициент Пуассона***

По теории упругости, зная продольную ( $V_p$ ) и поперечную скорости ( $V_s$ ), плотность образца ( $\rho$ ), можно выразить сразу три упругих параметра: динамический модуль упругости ( $E_d$ ), динамический модуль сдвига ( $G$ ) и коэффициент Пуассона ( $U$ ). Расчетные формулы для этих параметров будут иметь следующий вид соответственно:

$$E_d = \rho V_B^2 (3 V_p^2 - 4 V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2); \quad (1.14)$$

$$G = p V_s^2; \quad (1.15)$$

$$U = (V_p^2 - 2V_B^2) / 2(V_p^2 - V_B^2) \text{ (Зыков, 1989).} \quad (1.16)$$

### *Модуль упругости Юнга*

Согласно методике ПНИИС (1998), с помощью специальной номограммы можно рассчитать модуль Юнга мерзлого грунта, если известны скорость распространения продольных волн, коэффициент Пуассона и его плотность (рисунок 1.4).

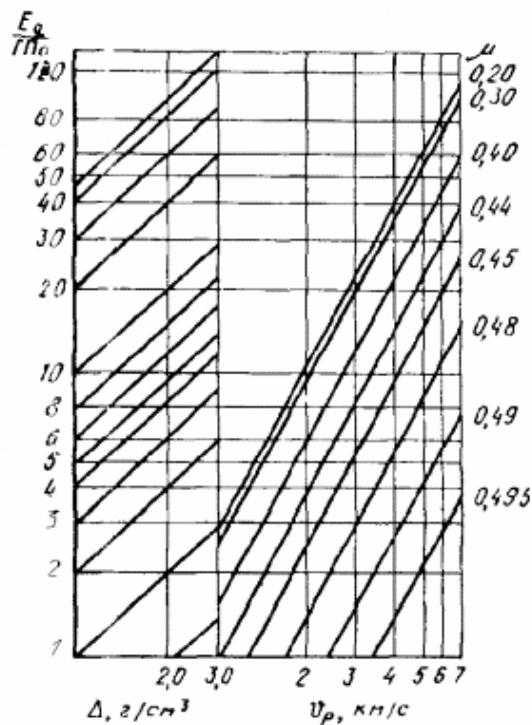


Рисунок 1.4. Номограмма для определения модуля упругости Юнга по значениям скорости продольных волн, коэффициента Пуассона и плотности (Зыков, 1989).

### *Модуль деформации*

Количественное выражение между упругими параметрами и деформационными или прочностными характеристиками определяется с

помощью корреляции и выражается в виде эмпирических зависимостей (Рекомендации, 1989):

$$E_{\text{деф}} = \frac{V_p^2}{10^4}, \quad (1.17)$$

где  $E_{\text{деф}}$  - модуль деформации;  $V_p$  – скорость продольной волны.

В работе Н.Н. Горянина (СП 446.1325800-2019) была рассмотрена корреляционная зависимость между модулем деформации и скоростью продольных волн в мерзлых глинах и супесях. По результатам исследований было получено степенное уравнение вида:

$$E = 8,163 \cdot 10^{-6} V_p^2, \quad (1.18)$$

где  $E$  — модуль деформации (МПа),  $V_p$  — скорость продольной волны (м/с).

### *Сцепление*

Зыков Ю.Д. и Червинская О.П. также исследовали корреляционную связь между сцеплением и скоростью продольных волн для мерзлых дисперсных грунтов, получив степенную зависимость:

$$C = 1,8 \cdot 10^{-5} V_p^{1,75}, \quad (1.19)$$

где  $C$  — сцепление (МПа),  $V_p$  — скорость продольной волны (м/с).

### *Одноосное сжатие*

В исследовании Б.Г. Хазина и Б.В. Гончарова (1973) была установлена связь прочности мерзлых грунтов на одноосное сжатие со скоростью продольных волн и коэффициентом затухания.:

$$\sigma_{\text{сж}} = a V_p + b \alpha + c, \quad (1.20)$$

где  $\sigma_{сж}$  — прочность на сжатие,  $V_p$  — скорость продольных волн,  $\alpha$  — коэффициент затухания,  $a, b, c$  — регрессионные коэффициенты.

Опыты проводились на мерзлых глинах и супесях, коэффициенты корреляции показали высокие значения 0,899 и 0,950 соответственно. Коэффициент вариации прочности на одноосное сжатие, рассчитанной по полученному уравнению, колеблется в интервале 0,16-0,19, что не превышает 0,3 — верхнего предела коэффициента вариации для механических характеристик грунтов согласно ГОСТ 20522.

В работе Зыкова эмпирическая зависимость между прочностью на сжатие и скоростью продольных волн для мерзлых дисперсных грунтов при фиксированных температурах может быть представлена полиномом второй степени:

$$\sigma_{сж} = a V_p^2 + b V_p + c, \quad (1.21)$$

где  $\sigma_{сж}$  — прочность на сжатие,  $V_p$  — скорость продольных волн, а  $a, b, c$  — аппроксимирующие коэффициенты, являющиеся функциями температуры (Зыков, 1989).

Анализ, проведенный Зыковым Д.Ю. и Червинской О.П. (1989), показал, что для мерзлых дисперсных грунтов с массивной криогенной текстурой существует устойчивая зависимость между прочностью при одноосном сжатии и скоростью распространения продольных волн. Как установлено путем обобщения результатов экспериментов, данная зависимость в полулогарифмических координатах аппроксимируется линейными функциями для фиксированных температурных значений. Исследователи также выявили обратную корреляцию прочности с динамическим коэффициентом Пуассона, который снижается при уменьшении температуры, дисперсности и засоленности. Практическим результатом работы стала номограмма, позволяющая оценивать прочность грунта по измеренным значениям скорости  $V_p$  и температуры. Схожая линейная зависимость между

$V_p$  и эквивалентным сцеплением в условиях испытаний шариковым штампом была позднее подтверждена Фроловым А.Д. (2005).

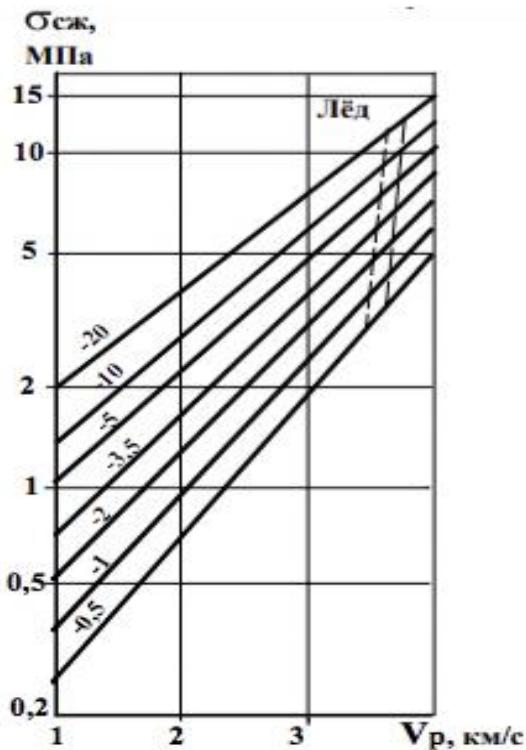


Рисунок 1.5. Номограмма для определения прочности на одноосное сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) по значениям скорости продольных волн ( $V_p$ ) и температуры в мерзлых песчано-глинистых грунтах с массивной криотекстурой (Зыков, Червинская, 1989).

Особое внимание было уделено изучению связи скорости ультразвуковых волн и испытанию на одноосное сжатие в работе Dongqing Li и Xing Huang (2015). Измерение скорости продольных волн проводилось одновременно с испытанием на одноосное сжатие. Значения скорости во многом зависели от типа грунта и величины прикладываемой нагрузки и температуры. Скорость продольных волн была выше в мерзлых песках, чем в пылеватых грунтах. Причем в начале опыта скорости несколько увеличивались, а затем понижались вместе с увеличением деформации. Это можно связать с тем, что в начале происходит уплотнение грунта. В результате исследования была получена хорошая экспоненциальная зависимость между

скоростью продольных волн и прочностью на одноосное сжатие в мерзлых песках и супесях с коэффициентом корреляции 0.966 и 0.997 соответственно:

$$\sigma_{сж} = Ae^{BV_p}, \quad (1.22)$$

где  $\sigma_{сж}$  — прочность на сжатие,  $V_p$  — скорость продольных волн, а A, B — эмпирические коэффициенты (Li Dongqing, Huang X, Ming F, et al., 2015).

Аналогичное исследование было проведено на мерзлых супесях различной влажности. С помощью регрессионного метода была получена высокая корреляция 0.98 с уравнением вида:

$$\sigma_{сж} = A V_p^B, \quad (1.23)$$

где  $\sigma_{сж}$  — прочность на сжатие,  $V_p$  — скорость продольных волн, а A, B — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа грунта, плотности, температуры и влажности. Таким образом, при использовании этой формулы для прогноза прочности на сжатие мерзлого грунта необходимо учитывать свойства грунта (Xing Huang, Dongqing Li, et al., 2015).

В научных трудах О.К. Воронкова также уделено внимание исследованию корреляционных связей между прочностью на одноосное сжатие и скоростям упругих волн. Важно отметить, что исследование проводились на крупнообломочных льдонасыщенных грунтах, что не совпадает с выше заявленной темой. Однако, подход, который включает в себя поиск корреляционных зависимостей одновременно и от акустических, и от электрических свойств грунта может быть актуален и для исследования дисперсных грунтов.

Высокие показатели коэффициентов корреляции в диапазоне от 0,89 до 0,94 служат основанием для применения установленных зависимостей в практической деятельности. Необходимым условием при этом является неукоснительное соблюдение требований к идентичной процедуре

проведения испытаний. Следует отметить, что наряду с сейсмическими данными, в ряде исследований успешно применялось и сопротивление пород в качестве коррелируемого параметра.

В результате анализа большого массива экспериментальных данных исследований крупнообломочных льдонасыщенных грунтов О.К. Воронковым были получены следующие регрессионные уравнения для зависимости соотношения статических модулей от геофизических параметров:

$$\text{a) } \lg E_{CT} = 1,86 + 0,5V_p; \quad \lg E_0 = 0,93V_p; \quad (1.24)$$

$$\text{б) } \lg E_{CT} = 2,5 + 0,2 \lg p; \quad \lg E_0 = 1,2 + 0,45 \lg p; \quad (1.24)$$

$$\text{в) } \lg E_0 = 1,5 + 0,115V_p \lg p; \quad (1.24)$$

$$\text{г) } \lg E_0 = 1,8 + 0,35V_p \lg p. \quad (1.27)$$

Кроме того, для льдонасыщенных крупнообломочных грунтов составлены и изучены зависимости прочности на одноосное сжатие от величин  $V_p$ ,  $V_p^2$ ,  $\lg \rho$  и  $V_p \cdot \lg \rho$ . На рисунок 1.6 график а) приведены уравнения, связывающие удельное электрическое сопротивление и скорость продольных волн, а на графике б) корреляционные кривые прочности на одноосное сжатие от скорости и сопротивления.

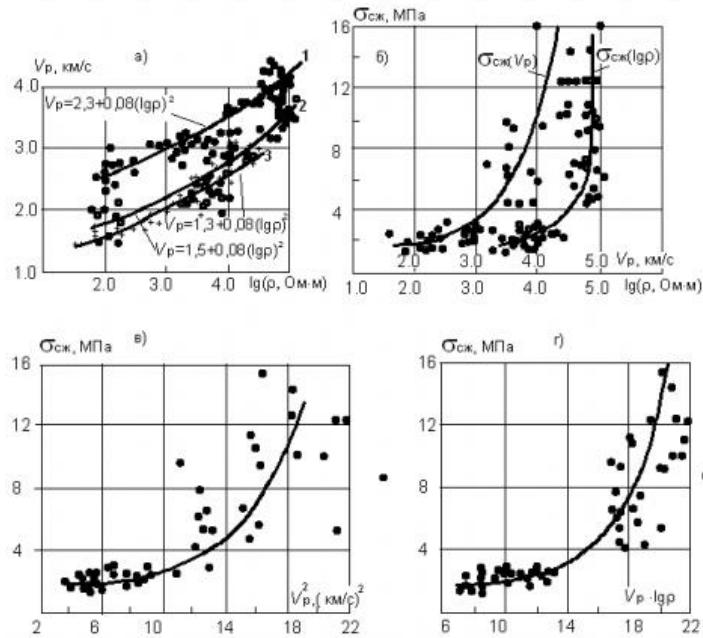


Рисунок 1.6. Примеры корреляционных связей характеристик крупнообломочных мерзлых льдонасыщенных грунтов и талых водонасыщенных незасоленных грунтов: а) связь значений  $V_p^2$  и  $\lg \rho$  в диапазоне температур от +20 до -25°C: 1 — щебень, гравий+песок + лед(вода); 2 — щебень, гравий + лед; 3 — щебень, гравий + глина + лед (вода); б) связь прочности на одноосное сжатие  $\sigma_{sj}$  льдонасыщенных крупнообломочных и песчано-крупнообломочных грунтов с  $V_p$  и  $\lg \rho$ ; в) то же, с  $V_p^2$ ; г) то же, с  $V_p \cdot \lg \rho$  (Воронков, 2008).

В исследовании Наук (2011) аналогично Воронкову использовались одновременно данные электроразведки и сейсмоакустических исследований. В результате была представлена модель для количественной оценки содержания льда, воды и воздуха в крупнообломочных отложениях на основе геофизических данных (удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн). Эта 4-фазная модель основана на сочетании закона Archie и расширения правила смешивания Timur.

### *Прочность на разрыв*

По сравнению с прочностью на одноосное сжатие и эквивалентным сцеплением связь прочности на разрыв и упругих свойств мерзлых

дисперсных грунтов более сложна и менее изучена. Исследования Фролова демонстрируют противоположный характер зависимостей для разных механических свойств: при -20...-40 °С мерзлые суглинки имеют двукратное преимущество по прочности на разрыв по сравнению с песками, в то время как модули упругости и скорости распространения волн у них оказываются ниже. Данный эффект связан с наличием в глинистых грунтах незамёрзшей воды, уменьшающей их прочность при одноосном сжатии и упругие характеристики.

Причиной наблюдаемого эффекта является различие фазовых состояний пространственно-криогенной кристаллизационно-коагуляционной структуры (ПККС). У суглинков прочность снижается адсорбционно из-за незамёрзшей воды, при этом межзерновые контакты играют роль дефектов. Относительно высокое содержание жидкой фазы предотвращает переход структуры в хрупкое состояние. В отличие от них, в песках при данных температурах происходит полное промерзание влаги, что обуславливает хрупкость и структурную однородность (Фролов, 2005).

В работе Б.Г. Хазина и Б.В. Гончарова 1973 года также рассмотрена зависимость прочности на разрыв мерзлых дисперсных грунтов от скорости продольных волн и коэффициента затухания:

$$\sigma_p = a V_p + b \alpha + c, \quad (1.28)$$

где  $\sigma_p$  — прочность на сжатие,  $V_p$  — скорость продольных волн,  $\alpha$  — коэффициент затухания,  $a, b, c$  — регрессионные коэффициенты.

Опыты проводились на мерзлых глинах и супесях, коэффициенты корреляции показали значения чуть ниже, чем для аналогичного эксперимента с одноосным сжатием, 0,893 и 0,941 соответственно. Коэффициент вариации прочности на разрыв, рассчитанной по полученному уравнению, колеблется в интервале 0,16-0,19, что не превышает 0,3 – верхнего предела коэффициента вариации для механических характеристик грунтов согласно ГОСТ 20522-96.

В исследовании Huang (2013) рассматривалась корреляция между скоростями акустических волн и прочностью на разрыв для образцов мерзлых глинистых грунтов с различными влажностями. Регрессионный анализ показал экспоненциальную зависимость между характеристиками. Регрессионные уравнения получены, как в зависимости от продольных волн, так и поперечных:

$$\sigma_p = A e^{BV_s}; \quad (1.29)$$

$$\sigma_p = C e^{DV_p}, \quad (1.30)$$

где  $\sigma_p$  — прочность на разрыв,  $V_p$  и  $AV_s$  — скорости продольных и поперечных волн соответственно,  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $D$  — эмпирические коэффициенты, зависящие от состава грунта (Huang, 2013).

При этом коэффициенты корреляции для обоих уравнений превысили 0,98, что говорит о действительно высокой зависимости между скоростями продольных и поперечных волн и прочностью на разрыв.

### *Эквивалентное сцепление*

В соответствии с ГОСТ 30416-2020 эквивалентное сцепление — это комплексная характеристика прочности мерзлого грунта, учитывающая как собственно сцепление, так и наличие внутреннего трения.

В исследовании Chervinskaya, O. P., A. D. Frolov, and Y. D. Zykov, (1998) рассмотрена корреляция между упругими и прочностными свойствами мерзлых засоленных грунтов. Результаты экспериментов на мерзлых засоленных грунтах от песчаного до глинистого состава при фиксированных температурах собраны воедино и аппроксимированы одним регрессионным уравнением с коэффициентом корреляции 0,81:

$$C_{eq} = AV_p^B, \quad (1.31)$$

где  $C_{eq}$  — эквивалентное сцепление,  $V_p$  — скорость продольной волны, А и В — эмпирические коэффициенты.

Связь между эквивалентным сцеплением и скоростью продольных волн аналогична прочности на одноосное сжатие и скорости продольных волн. В дальнейших исследованиях корреляции между эквивалентным сцеплением и скоростью продольных волн в пресных и засоленных мерзлых дисперсных грунтах получено уравнение:

$$C_{eq} = AV_p + B, \quad (1.32)$$

где  $C_{eq}$  — эквивалентное сцепление,  $V_p$  — скорость продольной волны, А и В — эмпирические коэффициенты. (Фролов, 2005).

### *Выводы*

Рассмотрено применение геофизических методов для оценки физических и механических свойств мерзлых дисперсных грунтов. По результатам исследований различных авторов составлены таблицы 1.3 и 1.4, в которых зафиксированы уравнения для оценки физических и механических свойств с помощью геофизических данных.

Методы георадиолокации и радиоизотопные методы возможно применять для оценки таких физических свойств, как влажность и плотность (таблица 1.3). Основными методами для оценки физико-механических свойств являются сейсмоакустические методы и электроразведка.

В исследованиях Зыкова (1989) приведены методики оценки льдистости и криогенной текстуры электроразведкой и сейсмоакустическими методами с помощью анизотропии свойств (УЭС и скорости волн соответственно).

Таблица 1.3. Использование георадиолокации и радиоизотопных методов для оценки физических свойств мерзлых грунтов.

Геофизические методы	Радиоизотопные методы			Георадиолокация		
Характеристика состава и свойств грунтов	Формула	Автор	Вид грунта	Формула	Автор	Сколько образцов, вид грунта
Влажность	$W_{oi} = (N_i/N_b) a_w$	Зыков Ю.Д.	Дисперсные грунты	$W_{tot} = -47,9 + 815,3 \times V - 7,14 \times G$	Нерадовский Л.Г.	Дисперсные грунты Центрально-Якутской равнины
Плотность	$g_i = 1 + a_g \lg N_b/N_i$	Зыков Ю.Д.	Дисперсные грунты	—	—	—

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.

Например, для прочности на одноосное сжатие Xing Huang и Dongqing Li рассматривают степенную зависимость, а в работе Зыкова предложен полином второй степени. Для оценки прочности на разрыв в работе Huang найдена экспоненциальную зависимость, когда как Хазин и Гончарова получили результат при линейной зависимости и учете коэффициента затухания.

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 значительно определяет прочностные свойства мерзлых грунтов.

Из таблицы 1.4 видно, что содержание незамерзшей воды можно оценить с помощью акустических и электрических методов: скорость продольных волн хорошо коррелирует с соотношением жидкой и твердой фаз воды, тогда как для электроразведки важна электропроводность порового раствора.

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 не меняются, например, гранулометрический состав, минеральный состав, а есть подвижные факторы 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 проекте рассматриваются именно мерзлые засоленные грунты.

Таблица 1.4. Использование методов электроразведки и сейсмоакустики для оценки физических и механических свойств мерзлых грунтов.

Геофизические методы	Электроразведка			Сейсмоакустические методы		
Характеристика состава и свойств грунтов	Формула	Автор	Вид грунта	Формула	Автор	Вид грунта
Пористость	—	—	—	$e=2,6-\frac{V_s}{37\sigma^{1/4}}$	Jarvis	Песчаный грунт
Льдистость и криогенная текстура	номограмма	Зыков Ю.Д	Дисперсный грунт	номограмма	Зыков Ю.Д.	Дисперсный грунт
Влажность незамёрзшей воды	$W_w = \frac{\sigma_{wT_0}}{\sigma_{wT}} [1 - \beta(T_0 - T)]$ $\rho = m W_w^n$	Dafflon Tang	Засоленные дисперсные грунты Пылеватые грунты	$W_w=W_{tot} - (V_{h(t=0)} - V_{(t=i)}) \frac{(W_{tot} - W_{g(t=-24)})}{(V_{h(t=0)} - V_{(t=-24)})}$ $W_w=A V_p + B$	Кальбергеннов Р.Г., Зыков Ю.Д.  Li dongqing	Дисперсные грунты  Пылеватый грунт
Коэффициент Пуассона	—			$U=(V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2)$	Зыков Ю. Д.	Дисперсные грунты
Модуль Деформации	—			$E=\frac{V_p^2}{10^4}$ $E=8,16310^{-6} V_p^2$	Зыков Ю.Д. Горяинов Н.Н.	Дисперсные грунты
Сцепление	—			$C=1,8 \cdot 10^{-5} V_p^{1,75}$	Зыков Ю.Д., Червинская О.П.	Дисперсные грунты

Геофизические методы	Электроразведка			Сейсмоакустические методы	
Прочность на сжатие	—		$\sigma_{сж} = a V_p^2 + b V_p + c$ $\sigma_{сж} = A V_p^B$	Зыков Ю.Д. Xing Huang, Dongqing Li	Дисперсные грунты Супесь
Прочность на разрыв	—		$\sigma_p = Ae^{BV_s}; \sigma_p = Ce^{DV_p}$ $\sigma_p = a V_p + b \alpha + c$	Huang Хазин и Гончарова	Глинистый грунт Глины и супеси
Эквивалентное сцепление	—	—	$C_{eq} = AV_p + B$ $C_{eq} = AV_p^B$	Фролов А.Д. Червинская О.П., Фролов А.Д., Зыков Ю.Д.	Дисперсные грунты Засоленные дисперсные грунты

## Глава 2. Методика экспериментальных исследований

### 2.1 Характеристики грунтов нарушенного сложения

Для проведения практических исследований были отобраны пробы грунта в районе северной части Большеземельской тундры. Отложения относятся к средне-верхнеплейстоценовому периоду и имеют ледниково-морской генезис (gmQII-III). Основная часть разреза территории представлена суглинками, в то время как пески и супеси имеют подчинённое значение. Верхний горизонт характеризуется достаточно высокими значениями влажности, которая уменьшается с глубиной.

Исследования проводились на двух разновидностях грунта (песок и суглинок), которые преобладают в районе Большеземельская тундры и при этом являются наиболее типичными разновидностями дисперсных грунтов для криолитозоны России.

- Песок темно-серого цвета, окатанный, хорошо сортированный, бидисперсный. В соответствии с ГОСТ 25100-2020 относится к пылеватому песку. Плотность частиц составляет  $2,66 \text{ г}/\text{см}^3$ , естественная влажность 10-25%, пористость 0,4-0,6 д.е.
- Суглинок в соответствии с ГОСТ 25100-2020 относится к легкому пылеватому суглинку. В составе преобладают частицы размером 0,01-0,05 мм. Влажность на пределе раскатывания 18,1%, влажность на пределе текучести 29,6%, число пластичности 11,5%, плотность частиц грунта  $2,71 \text{ г}/\text{см}^3$ , естественная влажность 20-43%, пористость 0,31-0,7 д.е.

Определение гранулометрического состава грунтов проводилось ситовым и ареометрическим методами в соответствии с ГОСТ 12536-2014. Характеристики физических свойств грунтов были определены расчетными методами в соответствии с ГОСТ 5180-2015.

## 2.2 Планирование экспериментов и подготовка образцов

Поровые растворы природных пород, как морского, так и континентального типа засоления, характеризуются поливалентным составом. При низких отрицательных температурах концентрация легкорастворимых солей в этих растворах может достигать значительных величин (Комаров, 2018). В соответствии с ГОСТ 25100-2020 засоленные грунты характеризуются следующими определениями.

Засоленность — характеристика, определяемая количеством водорастворимых солей в грунте,  $D_{\text{sal}} \%$ , равная отношению массы водорастворимых солей в грунте к массе абсолютно сухого грунта.

Охлажденный грунт — засоленный грунт, отрицательная температура которого выше температуры начала замерзания ( $T_{bf}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), при которой в порах грунта появляется лед.

Мерзлые грунты с морским (хлоридным) типом засоления, обусловленным легкорастворимыми солями, классифицируют по степени засоленности ( $D_{\text{sal}}$ , %) в соответствии с данными таблицы 2.1.

Таблица 2.1. Классификация грунтов по степени засоленности.

Разновидность грунтов	Степень засоленности легкорастворимыми солями $D_{\text{sal}}, \%$		
	песок	супесь	Суглинки и глины
Незасоленный	$D_{\text{sal}} < 0,05$	$D_{\text{sal}} < 0,15$	$D_{\text{sal}} < 0,20$
Слабозасоленный	$0,05 \leq D_{\text{sal}} < 0,15$	$0,15 \leq D_{\text{sal}} < 0,35$	$0,20 \leq D_{\text{sal}} < 0,40$
Среднезасоленный	$0,15 \leq D_{\text{sal}} < 0,30$	$0,35 \leq D_{\text{sal}} < 0,60$	$0,40 \leq D_{\text{sal}} < 0,80$
Сильнозасоленный	$D_{\text{sal}} \geq 0,30$	$D_{\text{sal}} \geq 0,60$	$D_{\text{sal}} \geq 0,80$

Физико-механические свойства засоленных грунтов определяются концентрацией солей в поровом растворе ( $C_{ps}$ ), которая связана с общей засоленностью следующим соотношением:

$$C_{ps} = D_{\text{sal}} / (D_{\text{sal}} + W_{\text{tot}}), \quad (2.1)$$

где  $W_{tot}$  — суммарная влажность грунта, %.

Для незасоленных грунтов нарушенного сложения, описанных в разделе 2.1, искусственно задавались различные значения влажности и засоленности. В качестве соли использовался NaCl, что соответствует морскому типу засоления.

Значения засоленности задавались в пять ступеней для песка (0,07%, 0,14%, 0,26%, 0,6%, 0,9%) и в семь для суглинка (0,17%, 0,35%, 0,48%, 0,78%, 0,9%, 1,2%, 1,6%). Ступени задавались таким образом, чтобы модельные грунты отражали все три основных градации степени засоленности для мерзлых грунтов: слабозасоленный, среднезасоленный и сильнозасоленный (таблица 2.1). Для сильнозасоленных была сделана более дробная градация для оценки их свойств.

Для оценки влияния влажности модельным грунтам назначалось 3 ступени влажности. Песчаные грунты: 10% — минимальная влажность по данным обобщения свойств мерзлых песчаных грунтов, отобранных в районе Большеземельская тундры; 19% — влажность, соответствующая полному водонасыщению (грунт характеризуется полным заполнением пор влагой, для каждого грунта эти значения индивидуальны); 15% — среднее значение влажности. Глинистые грунты: 20% — влажность, соответствующая значению предела на границе раскатывания; 36% — влажность, соответствующая полному водонасыщению; 30% — среднее значение влажности, соответствующее значению предела на границе текучести.

Образцы грунтов со средними значениями влажности необходимы для проверки полученных корреляционных зависимостей, поэтому для них задавалось по три различных значения засоленности: 0,14%, 0,26%, 0,9% для песка и 0,35%, 0,78%, 1,6% для суглинка. Температура в значительной степени влияет на механические (Роман, 2002) и физические свойства (Зыков, 2007), поэтому испытания проводились при трех различных температурах -2, -4, -6°C.

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. Таким образом, метод шарикового штампа имеет широкое применение при инженерно-геологических изысканиях в криолитозоне. Общая схема проведения экспериментов приведена на рисунке 2.1.

#### Исходные характеристики грунтов\*

Экспериментальные исследования (температура -2, -4, -6 °C)									
		Песок			Суглинок				
		Влажность, %	10	15	19	20	30	36	
Засоленность, %	I					0,17			0,17
	II	0,07	0,14	0,14	0,07	0,14	0,35		0,35
	III	0,26		0,26	0,26	0,48	0,78	0,5	0,48
	IV	0,6	0,9	0,9	0,6	0,9	0,9	1,2	0,9
						1,2	1,6	1,2	1,2
						0,9	1,2	1,6	1,6

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

Рисунок 2.1. Схема проведения экспериментов.

Для подготовки образца грунт был высушен и измельчен путем просеивания через сито с размером ячеек 2 мм. Полученный порошок охлаждали, после чего формировали слой толщиной 2-3 см, который увлажнялся соляным раствором. Этот раствор подготавливали, растворяя в дистиллированной воде необходимое количество хлорида натрия (NaCl) для достижения запланированных значений влажности и засоленности. Смесь тщательно перемешивали шпателем во избежание образования комков, а

также для равномерного распределения влаги. Для этого предварительно рассчитывали объем добавляемой воды  $Q_p$  ( $\text{см}^3$ ) по формуле:

$$Q_p = \frac{m_r (W_3 - W)}{\rho_w (1 + W)}, \quad (2.2)$$

где  $m_r$  — представляет собой массу исследуемого грунта с влажностью  $W$ , г;  $W_3$  — заданная влажность, д.е.;  $W$  — исходная влажность грунта, д.е.;  $\rho_w$  — плотность воды, величина которой принята за 1 г/см<sup>3</sup>.

Приготовленную смесь выдерживали в герметичных условиях в течение суток, контролируя процесс равномерного распределения влаги.

После этого методом послойного уплотнения сформировали образцы в трёх кольцах, внутренняя поверхность которых была предварительно смазана вазелином. Параллельно проводили измерение плотности. Массу грунта, необходимую для достижения в объёме кольца заданной плотности скелета ( $\rho_{d3}$ ), рассчитывали по формуле.

$$m_r = V_k \rho_{d3} / (1 + W_3), \quad (2.3)$$

где  $m_r$  — масса исследуемого грунта, г;  $V_k$  — внутренний объем рабочего кольца, см<sup>3</sup>;  $W_3$  — заданная влажность грунта, д.е.;  $\rho_{d3}$  — заданная плотность скелета грунта, г/см<sup>3</sup>.

Формирования массивной криогенной текстуры в образцах достигалось за счет быстрой заморозки, что предотвращало миграцию влаги. Образцы помещали в холодильную камеру с температурой -10°C на 24 часа (рис. 2.2). Для проверки возможного перемещения влаги создавались дополнительные контрольные образцы. Их вскрывали после заморозки для анализа распределения влаги.



Рисунок 2.2. Образец суглинка с массивной криогенной текстурой.

Подготовленный образец со шлифованными торцами взвешивался для определения значений плотности и влажности с последующей установкой в рабочее кольцо измерительного оборудования.

Лабораторное определение засоленности проводилось методом химического анализа водных вытяжек в соответствии с требованиями ГОСТ 26423-85. В рамках исследований было выполнено количественное определение массовых долей катионов (натрий, калий, магний, кальций) и анионов (хлорид-ионы, сульфат-ионы, бикарбонат-ионы).

## 2.3 Определение электрических и акустических характеристик грунтов

*Электрические свойства.* Удельное электрическое сопротивление определяли методом микро-ВЭЗ. Измерительная система, созданная по схеме Шлюмберже (AMNB, рис. 2.3), включала грунтовую форму с четырьмя латунными электродами, генератор «Astra» для задания частоты и силы тока, и измеритель «APL-02» для фиксации напряжения. Измерения выполняли на частоте 4,88 Гц, что позволяло исключить влияние постоянных потенциалов электродов, сохраняя условия, аналогичные постоянному току. Расстояние

между электродами А и В составило 7 см, а между М и Н — 1 см. Электроды диаметром 3 мм, заточенные на концах, погружались в образец грунта на 3 мм, такого точечного контакта было достаточно для измерения напряжения.

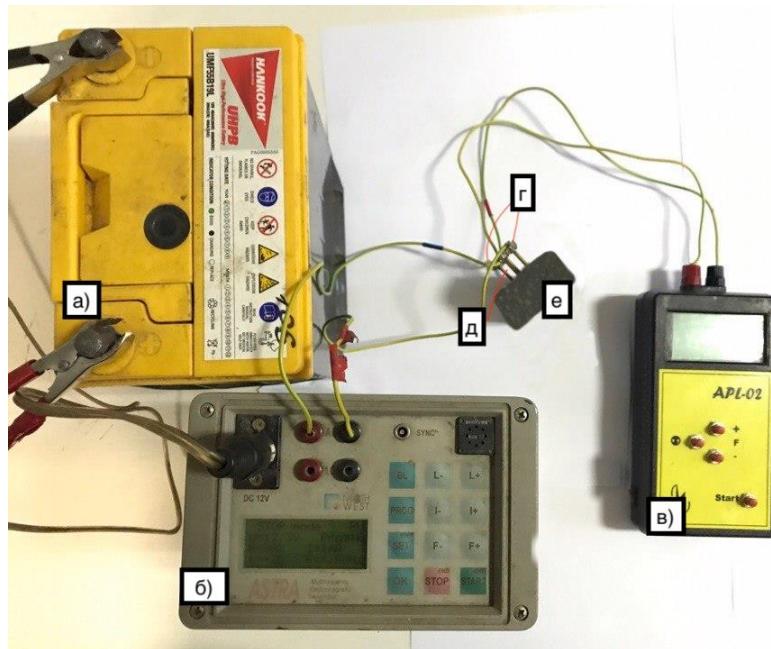


Рисунок 2.3. Измерительная установка УЭС: а) аккумулятор Hankook, б) генератор «Astra», в) измеритель «API-02», г) питающие электроды А и В, д) принимающие электроды М и Н, е) образец мерзлого грунта.

Расчет удельного электрического сопротивления проводился по закону Ома:

$$\rho = k(U/I), \quad (2.4.)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление ( $\Omega \cdot м$ ),  $U$  — напряжение (мВ),  $I$  — сила тока (мА).  $k$  — коэффициент установки, зависящий от формы и размеров образца, расстояний между электродами ( $б/м$ ).

Коэффициент установки находился с помощью номограммы Д. Ю Зыкова, по которой можно определить УЭС в зависимости от концентрации порового раствора заданной соли (рисунок 2.4.). Зная УЭС, измерялись сила тока и напряжение, затем по формуле (2.4.) рассчитывалось  $k$ .

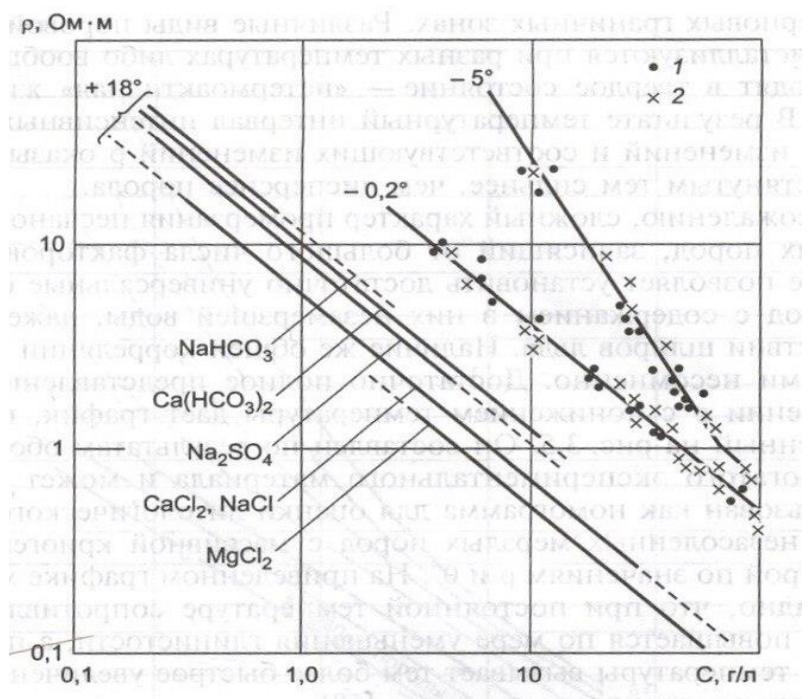


Рисунок 2.4. Зависимости удельного электрического сопротивления растворов солей от их концентрации и УЭС пород Ямала (1 — пески, 2 — суглинки), насыщенных растворами разного состава (Зыков, 2007).

На подготовительном этапе исследований были проведены эксперименты по установлению характера изменения калибровочного коэффициента измерительной установки в зависимости от концентрации порового раствора. Лабораторные исследования засоления грунтов показали наличие в образцах соли  $\text{NaCl}$ .

Результаты показали (таблица 2.2), что коэффициент установки при изменении концентрации раствора  $\text{NaCl}$  меняется, но незначительно. Поэтому при измерении УЭС в эксперименте бралось среднее значение  $k=0,07$  для всех образцов.

Измерения проводились на каждом образце при температурах  $-2$ ,  $-4$ ,  $-6^\circ\text{C}$ , перед этим образцы выставались не менее суток при температуре испытания. Каждый замер повторялся по три раза, затем рассчитывалось среднее значение.

Таблица 2.2. Результаты определения коэффициента установки при разных концентрациях раствора NaCl.

Концентрация, г/л	Сила тока, мА	Напряжение, В	УЭС, Ом·м	<b>k</b>
8	50	500	0,7	0,07
1	10	714	5	0,0700280 11
6	50	665	0,9	0,0676691 73
3	50	1300	1,8	0,0692307 69
10	50	413	0,57	0,0690072 64
0,5	5	713	10	0,0701262 27

*Акустические свойства.* Скорость продольных волн определяли с помощью ультразвукового дефектоскопа УД2Н-П (рис. 2.5). Измерения проводились импульсным ультразвуковым методом с использованием пьезоэлектрических датчиков поршневого типа. Работа в ультразвуковом диапазоне частот обусловлена необходимостью регистрации четких первых вступлений упругой волны, что является критически важным условием для точности лабораторных экспериментов.

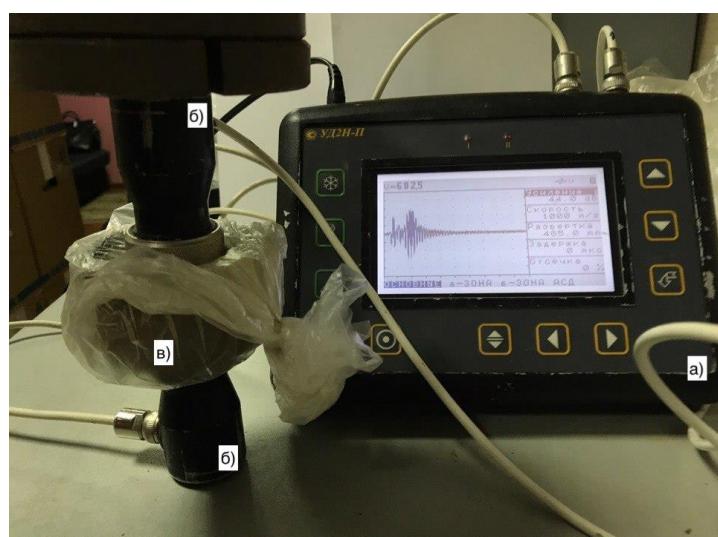


Рисунок 2.5. Измерение акустических характеристик: а) Ультразвуковой дефектоскоп УД2Н-П, б) пьезодатчики, в) кольцо с грунтом.

Для измерений применялись пьезодатчики на 100 кГц. На основе данных, полученных дефектоскопом УД2Н-П и обработанных в пакетах RadExPro и Microsoft Excel, был построен график (рис. 2.6) для определения времени прихода волны. Скорость продольной волны рассчитывалась по известной длине образца и найденному времени по формуле:

$$V_p = L/t \quad (2.5),$$

где  $V_p$  — скорость продольной волны (м/с),  $L$  — высота образца (м),  $t$  — время прихода волны (с).

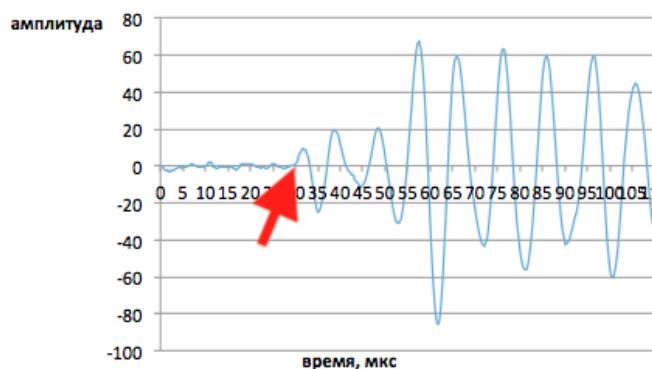


Рисунок 2.6. Запись волны (стрелкой отмечено время вступления Р-волны).

Перед измерениями образцы выдерживали в морозильной камере не менее 24 часов при заданных температурах: -2, -4 и -6°C. Для обеспечения воспроизводимости результатов верхний датчик во время каждого измерения пригружался эталонным грузом, что гарантировало идентичное усилие контакта. Все эксперименты повторяли трижды, а итоговое значение определяли как среднее арифметическое полученных данных.

## 2.4. Испытания шариковым штампом

Экспериментальные исследования мерзлых грунтов проводились методом шарикового штампа (диаметр 22 мм) конструкции НИС «Гидропроект» (рис. 2.7).

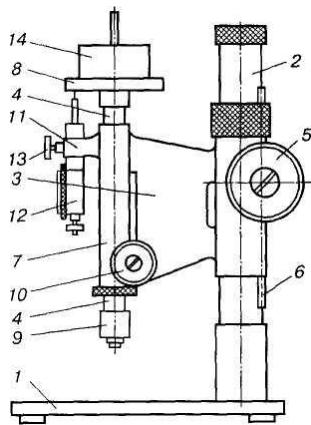


Рисунок 2.7. Одноштоковый сферический штамп конструкции НИС «Гидропроект»: 1 – опорная плита; 2 - направляющая стойка; 3 – консоль; 4 - верхний конец штока; 5 - нивелировочный винт; 6 – зубчатая рейка; 7 – направляющая муфта; 8 – площадка для размещения груза; 9 – шариковый штамп; 10 - стопорный винт; 11 – держатель индикатора; 12 – индикатор для измерения деформаций; 13- зажимной винт; 14 – груз.

Расчет прочности мерзлых грунтов методом вдавливания сферического штампа был разработан Н.А. Цытовичем (Цытович, 1973). В основу метода лег метод пробы Бринелля, с помощью которого определяется твердость материала. Простота и информативность получаемых данных сделали метод испытания мерзлого грунта шариковым штампом широко распространенным при инженерно-геологических изысканиях (Роман, 2018). В основу методики лёг расчёт эквивалентного сцепления, выполняемый по уравнению, выведенному С.С. Вяловым и Н.А. Цытовичем (1956) на основе решения А.Ю. Ишлинского (1944) о вдавливании сферы в упруго-пластичное полупространство. Данное уравнение описывает изменение прочности грунта во времени, комплексно учитывая влияние как сцепления, так и внутреннего трения.

Испытания выполнялись в двух режимах: длительном и ускоренном. Величина нагрузки на штамп назначалась в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.7-2020:

$$0,005 d_b < S_{15} < 0,05 d_b, \quad (2.6)$$

где  $d_b$  — диаметр шарикового штампа, а  $S_{15}$  глубина погружения шарикового штампа в образец за 15 минут после приложения нагрузки.

По завершении испытания, критерием окончания которого служила либо условная стабилизация деформации, либо истечение 8 часов для ускоренного режима, фиксировалась глубина погружения штампа по показаниям индикаторов. На основе полученных данных строится график зависимости эквивалентного сцепления от времени (рис. 2.8).

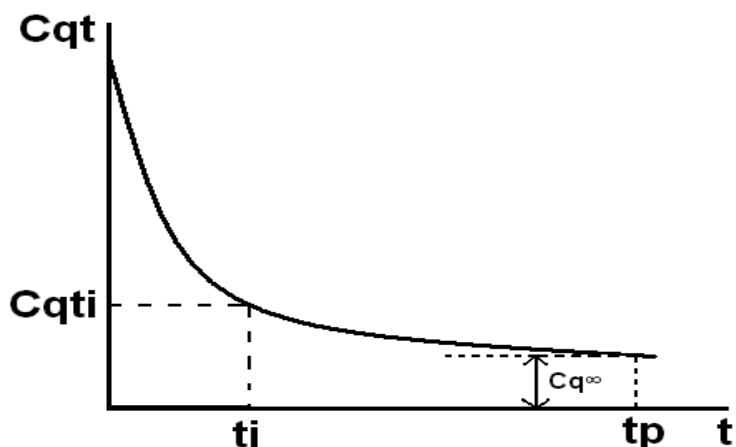


Рисунок 2.8. График зависимости изменения эквивалентного сцепления во времени.

Предельно длительное значение эквивалентного сцепления мерзлого грунта определяют с точностью 0,01 МПа по формуле:

$$C_{eq} = 0,06k \frac{P}{d S_t}, \quad (2.7)$$

где  $P$  — нагрузка на шариковый штамп (кН),  $d$  — диаметр шарикового штампа (см),  $S$  — глубина погружения шарикового штампа в грунт в конце испытания (см),  $k$  — безразмерный коэффициент, равный 1 при испытаниях до условной стабилизации деформации и 0,8 — при ускоренном режиме.

При ускоренном режиме испытаний вертикальная деформация образца фиксировалась через 1, 15, 30, 60, 180 и 240 минут после приложения нагрузки. В длительном режиме замеры производились через 1, 15, 30, 60, 180, 240 минут, а затем с суточной периодичностью до достижения условной стабилизации. Критерием стабилизации служило условие, при котором суточный прирост деформации не превышал 0,01 мм.

Для каждого образца выполнялось одно длительное и три ускоренных испытания.

По результатам восьмичасовых испытаний рассчитывается предельно длительное эквивалентное сцепление с помощью безразмерного коэффициента  $k$ , который соответствует отношению предельно длительного значения эквивалентного сцепления по результатам длительных испытаний к значению сцепления по результатам восьмичасовых испытаний.

На основе эксперимента шариковым штампом можно рассчитать модуль общей деформации, а также оценить величину сопротивления сдвигу мерзлого грунта (Роман, 2018).

## 2.5. Определение температуры начала замерзания

Процесс замерзания грунта характеризуется двумя ключевыми температурными точками: температурой переохлаждения и температурой начала замерзания поровой воды. Температура переохлаждения представляет собой разность между минимальной зафиксированной температурой воды до начала кристаллизации и температурой начала её замерзания. Температура начала замерзания — это установившееся значение температуры, которое регистрируется после резкого скачка (фазового перехода), следующего за

периодом переохлаждения. Скачок происходит за счет теплоты кристаллизации воды, следующей после переохлаждения (рисунок 2.9) (Савельев, 1989). Соотношение содержания влаги и массы минерального скелета будет влиять на смещение температуры начала замерзания в диапазон отрицательных температур. Содержание растворенных солей влияет на то, что процесс замерзания начинается при более низких температурах. Большинство грунтов в той или иной степени засолены. Особенно это характерно для морских и прибрежно-морских территорий.

Наличие солей в поровых растворах оказывает влияние на температуру замерзания, содержание незамерзшей воды и теплопроводность мерзлых пород. Ионы солей, взаимодействуя с молекулами воды, создают дополнительное препятствие процессу кристаллизации (Комаров, 2022). Вследствие этого наблюдается понижение температуры начала замерзания, увеличение содержания незамерзшей воды и снижение теплопроводных характеристик (Комаров, 2022).

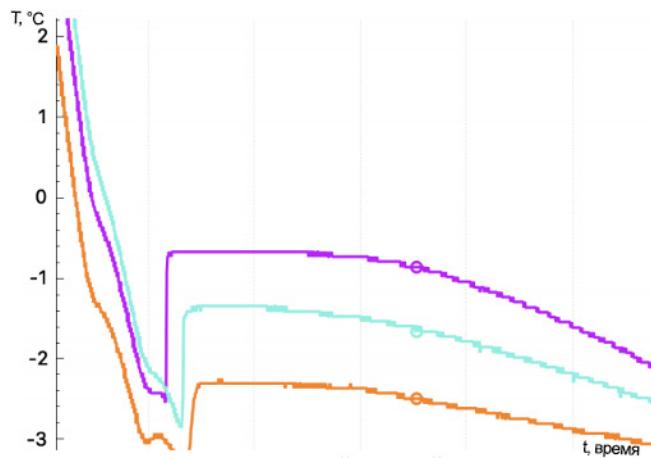


Рисунок 2.9. Скачок температуры при определении температуры замерзания.

В отличии от крупнозернистых грунтов, к которым условно применимо определение постоянной температуры замерзания, тонкозернистые грунты замерзают в спектре температур, так как с понижением температуры в них

увеличивается содержание льда (Баженова, 1954). Температурой начала замерзания будет являться наибольшая и наиболее стабильная во времени температура.

Температура начала замерзания грунта определялась экспериментально с помощью комплекса Kriolab Tbf (рисунок 2.10).

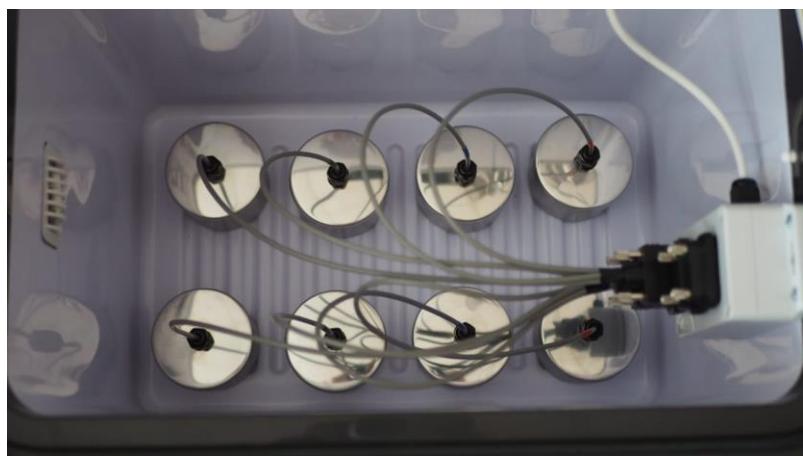


Рисунок 2.10. Установка для определения начала замерзания грунта.

Измерения проводились на грунтах (песок и суглинок), которые были описаны в разделе 2.1. Были заданы следующие характеристики свойств: песок с влажностью 14% и засоленностью 0,15%, 0,26%, 0,9%, суглинок с влажностью 26% и засоленностью 0,42%, 0,9%, 1,6%.

После приготовления образцы замораживались при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  для создания массивной криогенной текстуры. Приготовленные образцы выставлялись в холодильной камере не менее суток при исследуемых температурах ( $-4^{\circ}\text{C}$ ,  $-6^{\circ}\text{C}$ ) перед определением геофизических параметров. Скорости продольных волн и значения удельного электрического сопротивления определялись согласно методике, описанной в разделе 2.3.

Температура начала замерзания грунта определялась экспериментально. Тщательно перемешанный грунт заданной влажности заполнялся в цилиндрические капсулы, объёмом  $80 \text{ см}^3$ , и уплотнялся. Перед началом эксперимента в центре капсулы в грунте делалось отверстие

меньшего диаметра, чем температурный датчик, в него вводился датчик таким образом, чтобы он находился примерно в геометрическом центре образца. Для определения температуры начала замерзания грунта применялся холодильный шкаф и прибор Тbf-8, состоящий из температурных датчиков и системы записи данных на компьютер. Подготовленные к эксперименту капсулы с грунтом помещались в холодильный шкаф для замораживания, в котором устанавливалась температура -6°C. На персональном компьютере включался режим сбора данных, в ходе которого производилось измерение температуры грунта. Частота сбора данных: 3 секунды.

По результатам испытаний строились диаграммы изменения температуры грунта во времени при замораживании и диаграммы изменения температуры грунта во времени при оттаивании. По каждой диаграмме, описывающей изменения температуры грунта во времени при замораживании, определялась температура замерзания. Температура замерзания определялась по «полке» на диаграмме — как наиболее высокая и устойчивая температура, наступающая вслед за температурным скачком от температуры переохлаждения (рисунок 2.10).

Все измерения повторяли три раза, затем рассчитывали среднее значение и статистически обрабатывали данные.

Также температуры начала замерзания определялась по расчетной формуле (2.8), предложенной в СП 25.13330.2020:

$$T_{bf} = A - B(53C_{ps} + 40C_{ps}^2), \quad (2.8)$$

где А — коэффициент, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта; Б — коэффициент, зависящий от типа засоления грунта.

## 2.6 Определения содержания незамерзшей воды

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. Характеристики свойств грунтов приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Характеристики свойств исследуемых грунтов.

Образец №	грунт	плотность $\rho$ , г/с <sup>3</sup>	суммарная влажность $W_{tot}$ , %	засоленность $D_{sal}$ , %	нижний предел $W_p$ , %	верхний предел $W_L$ , %
1	супесь	2	27,5	0,25	26	32
2	супесь	1,9	23,0	1,1	21	26
3	глина	1,82	38,2	0,4	10	29
4	глина	1,8	28,5	0,89	25	46

### *Расчетные методы*

#### *Формула Р.Г. Кальбергенова и Д.Ю. Зыкова*

Методика оценки содержания незамерзшей воды с помощью скорости продольных волн по формуле, разработанной Р.Г. Кальбергеновым и Д.Ю. Зыковым. Вырезанный и тщательно зачищенный с торцов образец мерзлого грунта помещался в резиновую эластичную оболочку. На торцах образца примораживались приемник и источник ультразвуковых волн. В нескольких точках боковой поверхности образца устанавливались термопары для измерения и контроля температур. Образец с датчиками помещался в холодильную камеру и выдерживался при начальной заданной отрицательной температуре не менее 3-4 часов до температурной стабилизации. После этого проводилось измерение и обработка данных по методике, описанной в статье Агапкина И.А. (Agapkin et al., 2019). При этом допустимая разница значений,

следующих друг за другом замеров, принималась равной не более 10 м/сек. Затем в холодильной камере задавался температурный режим на 1-2° ниже начального и после 3-4 часов стабилизации производился новый замер скоростей. Границы температурного диапазона измерений содержания незамерзшей воды составляли -1° и -14°C.

Далее расчет содержания незамерзшей воды проводился по формуле Д.Ю. Зыкова и Р.Г. Кальбергенова:

$$W_w = W_{tot} - (V_{H(t=0)} - V_{(t=i)}) \frac{(W_{tot} - W_g(t=-24))}{(V_{H(t=0)} - V_{(t=-24)})}, \quad (2.9)$$

где  $W_w$  – содержание незамерзшей воды,  $W_{tot}$  – суммарная влажность,  $W_g$  – гигроскопическая влажность при  $t = -24^\circ\text{C}$ ,  $V_{H(t=0)}$  – скорость продольных волн  $t=0^\circ\text{C}$ ,  $V_{(t=i)}$  – скорость продольных волн при  $i$ -той температуре,  $V_{(t=-24)}$  – скорость продольных волн при  $t = -24^\circ\text{C}$ .

#### *Формула по СП 25.13330.2020*

Согласно СП 25.13330.2020, содержание незамерзшей воды в мёрзлых грунтах (как засоленных, так и незасоленных) при температурах, не превышающих температуру начала замерзания, допускается рассчитывать по формуле:

$$W_w = \kappa_w W_p + \eta D_{sal}, \quad (2.10)$$

где  $W_w$  – содержание незамерзшей воды,  $\kappa_w$  – коэффициент, зависящий от числа пластичности и температуры,  $W_p$  – влажность грунта на границе пластичности,  $\eta$  – коэффициент, зависящий от засоленности,  $D_{sal}$  – засоленность грунта.

#### *Контактный метод*

Содержание незамерзшей воды определяли контактным методом, основанным на установлении динамического равновесия в системе «лёд-незамерзшая вода-пар» при равенстве химических потенциалов всех трёх фаз

(Методы..., 2004). Эксперименты проводили в соответствии с общепринятыми методиками геокриологических исследований (Ершов, 2004).

## 2.7 Статистическая обработка данных

Статистическая обработка результатов исследований геофизических (скорость продольных волн и удельное электрическое сопротивление) и прочностных (эквивалентное сцепление) характеристик проводилась согласно с требованиями ГОСТ 20522-2012. В соответствии с приведенными формулами были определены нормативные значения ( $X_n$ ), среднеквадратические отклонения ( $S$ ) и коэффициенты вариации ( $V$ ):

$$X_n = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i , \quad (2.11)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_n - X_i)^2} , \quad (2.12)$$

$$V = \frac{S}{X_n} , \quad (2.13)$$

где  $n$  — число определений характеристики;  $x_i$  — частные значения характеристики, получаемые по результатам отдельных  $i$ -х опытов.

## Глава 3. Результаты экспериментальных исследований

### 3.1 Механические свойства мерзлых засоленных грунтов

Для каждого испытания методом шарикового штампа составляется график зависимости эквивалентного сцепления от времени испытания. На рисунке 3.1 приведен пример графической обработки результатов испытаний шариковым штампом. Также для каждого эксперимента проводилась статистическая обработка с расчетами нормативного значения, среднеквадратического отклонения и коэффициента вариации.

Коэффициент вариации ( $V$ ), показывающий степень относительного разброса случайной величины, очень удобно использовать для сравнения данных при двух разных испытаниях. Анализ показал, что для шарикового штампа коэффициент вариации не превышает 0,15. Наибольшее значение коэффициента вариации получено для песка (0,147).

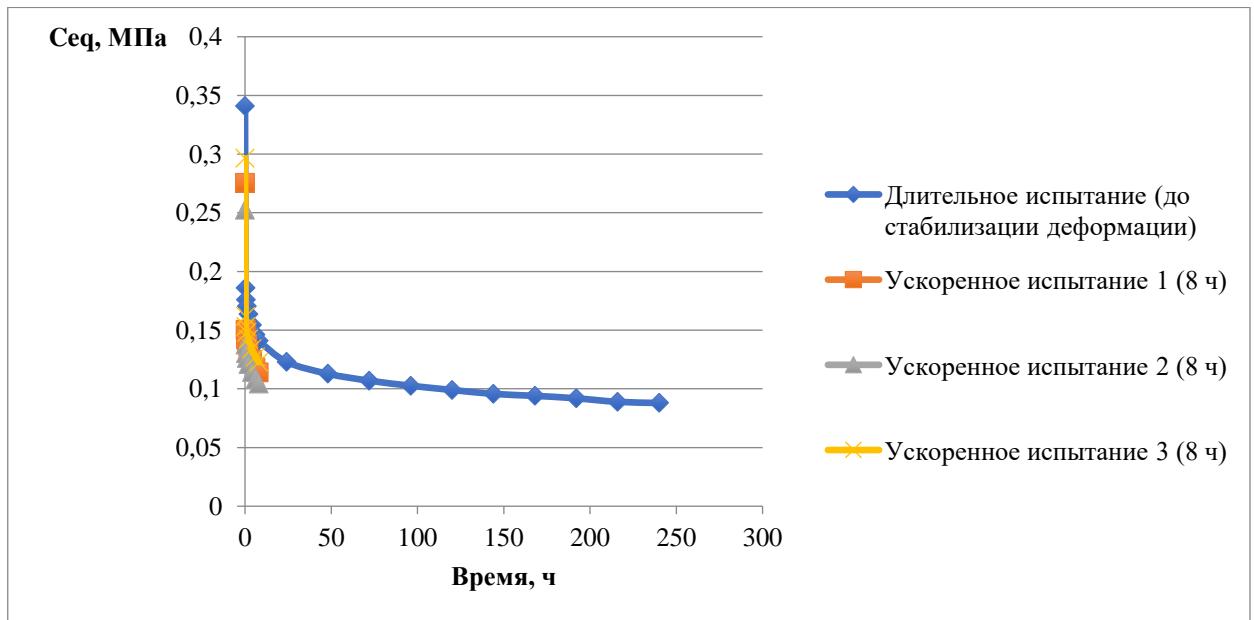


Рисунок 3.1. Зависимость эквивалентного сцепления от времени испытаний в результате одного длительного и трех ускоренных испытаний шариковым штампом для суглинка  $W=35\%$ ,  $D_{sal}=0,85\%$  при  $T=-6^{\circ}\text{C}$ .

Для мерзлых грунтов характерно увеличение прочности с понижением температуры, в первую очередь из-за увеличения количества

льдоцементационных связей. В результате понижения температуры содержание незамерзшей воды уменьшается, увеличивается количество льдоцементационных связей, и как следствие увеличиваются прочностные свойства мерзлого грунта.

Засоленность является важным фактором, влияющим на прочность мерзлых грунтов. В засоленном мерзлом грунте понижается температура начала замерзания, уменьшается сцепленность частиц грунта льдом, увеличивается содержание незамерзшей воды, в результате снижается прочность (Li et al., 2024; Kotov et al., 2022).

Всего было проведено 320 испытаний грунта методом шарикового штампа. Изменение эквивалентного сцепления в зависимости от влажности и степени засоленности образца, а также температуры эксперимента подробно представлено на рисунках 3.2 а), б), в). Максимальное значение эквивалентного сцепления в 0,85 МПа установлено для песков с наибольшей влажностью (19%) и наименьшей засоленностью (0,07%) при температуре -6°C. При увеличении засоленности до 0,9% эквивалентное сцепление уменьшается почти в 8 раз до 0,11 МПа (рисунок 3.2. а), зеленая кривая). Аналогичные закономерности установлены для образцов песка с влажностями 15 и 10% (рисунок 3.2. а), красная и синяя кривые). При увеличении температуры с -6 до -4°C эквивалентное сцепление понижается: для песков ( $D_{sal}=0,07\%$ ,  $W=19\%$ ) с 0,85 до 0,61 МПа; для песков ( $D_{sal}=0,14\%$ ,  $W=19\%$ ) с 0,57 до 0,36 МПа; для песков ( $D_{sal}=0,26\%$ ,  $W=19\%$ ) с 0,24 до 0,1 МПа; для песков ( $D_{sal}=0,6\%$ ,  $W=19\%$ ) с 0,13 до 0,7 МПа; для песков ( $D_{sal}=0,9\%$ ,  $W=19\%$ ) с 0,1 до 0,8 МПа (рисунок 3.2. а), б), зеленые кривые). При увеличении температуры с -4 до -2°C эквивалентное сцепление продолжается уменьшаться, при этом образцы с засоленностями выше 0,26% переходят в охлажденное состояние, поэтому на графике не показываются (рисунок 3.2. в). Аналогичные закономерности установлены для песков с влажностями 10 и 15%.

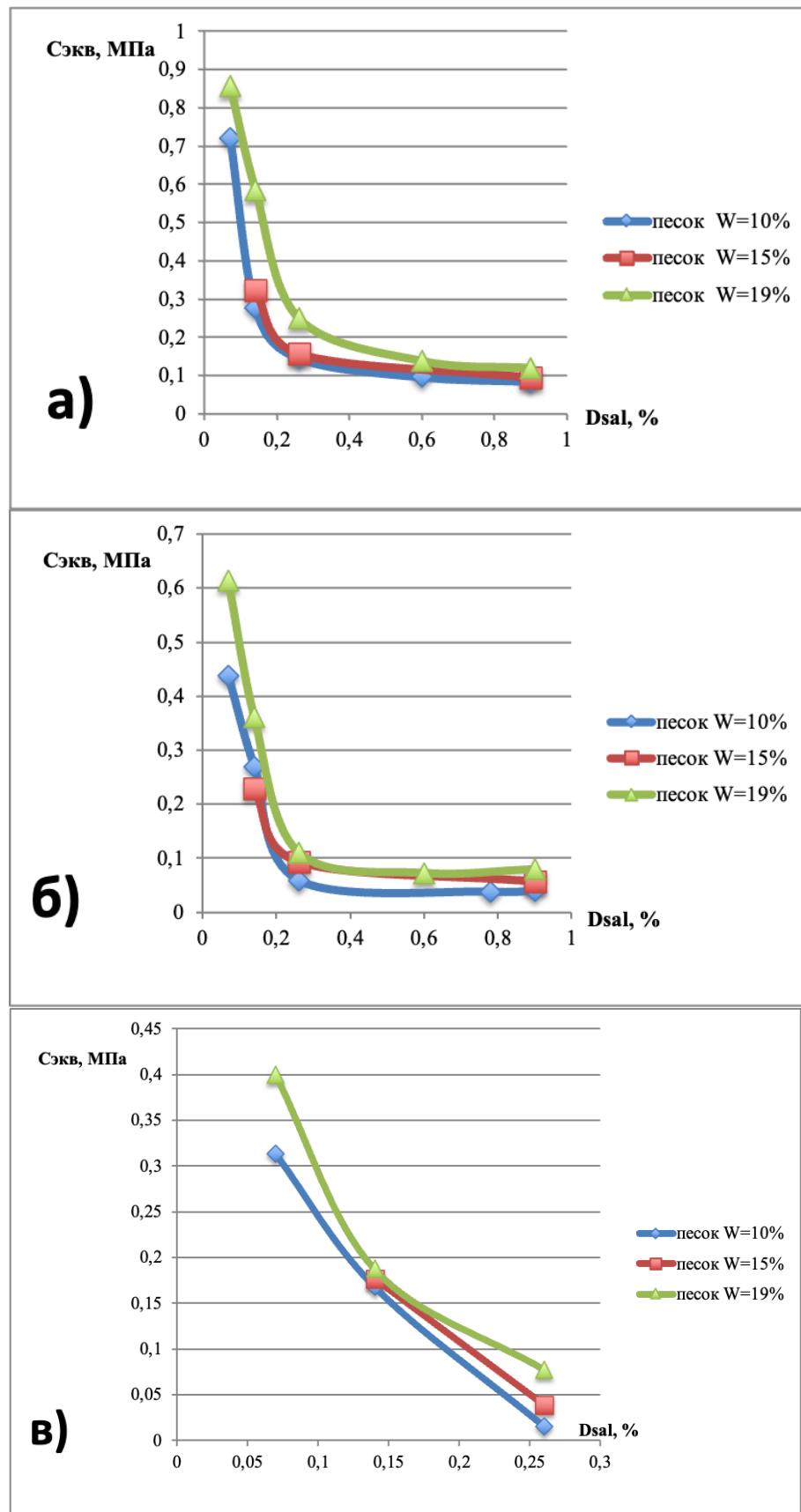


Рисунок 3.2. Графики зависимости эквивалентного сцепления от степени засоленности в песках при температуре: а)  $-6^{\circ}\text{C}$ . б)  $-4^{\circ}\text{C}$  в)  $-2^{\circ}\text{C}$ .

На рисунках 3.2 а), б), в) показаны зависимости эквивалентного сцепления от засоленности в песках при трех разных температурах: довольно ярко выражено уменьшение сцепления с повышением температуры, при этом образцам с большей влажностью соответствует большее значение сцепления. Таким образом, наибольшим сцеплением обладают образцы в условиях более низкой температуры, с большей влажностью и меньшей степенью засоленности. Меньшее содержание глинистых частиц, которые обладают двойным электрическим слоем, увеличивает влияние засоленности на прочностные свойства песков.

На рисунках 3.3 а), б), в) представлены зависимости эквивалентного сцепления от засоленности в суглинках при температурах -6, -4 и -2°C: аналогично, как и в песках, величина сцепления понижается с увеличением температуры, засоленность сильно понижает прочность, при этом суглиники с большей влажностью обладают большим сцеплением.

Наибольшее значение эквивалентного сцепления установлено в суглинках с наибольшей влажностью (36%) и наименьшей засоленностью (0,17%) 0,55 МПа. При увеличении засоленности до 1,6% эквивалентное сцепление уменьшается практически в 8 раз до 0,072 МПа.

Рассмотрим влияние влажности на величину эквивалентного сцепления: при понижении влажности с 36 до 20% для суглинков при температуре -6°C при засоленностих 0,17-1,6% эквивалентное сцепление уменьшилось с 0,55 до 0,51 МПа ( $D_{\text{sal}}=0,17\%$ ), с 0,47 до 0,35 МПа ( $D_{\text{sal}}=0,35\%$ ), с 0,26 до 0,17 ( $D_{\text{sal}}=0,48\%$ ), с 0,16 до 0,07 МПа ( $D_{\text{sal}}=0,78\%$ ), с 0,1 до 0,07 МПа ( $D_{\text{sal}}=0,9\%$ ), с 0,077 до 0,049 МПа ( $D_{\text{sal}}=1,2\%$ ), с 0,065 до 0,03 МПа ( $D_{\text{sal}}=1,6\%$ ).

При увеличении температуры эксперимента до -2°C эквивалентное сцепление продолжает уменьшаться, при этом образцы с засоленностями выше 0,9% переходят в охлажденное состояние, поэтому на графике не показываются (рисунок 3.3. в)).

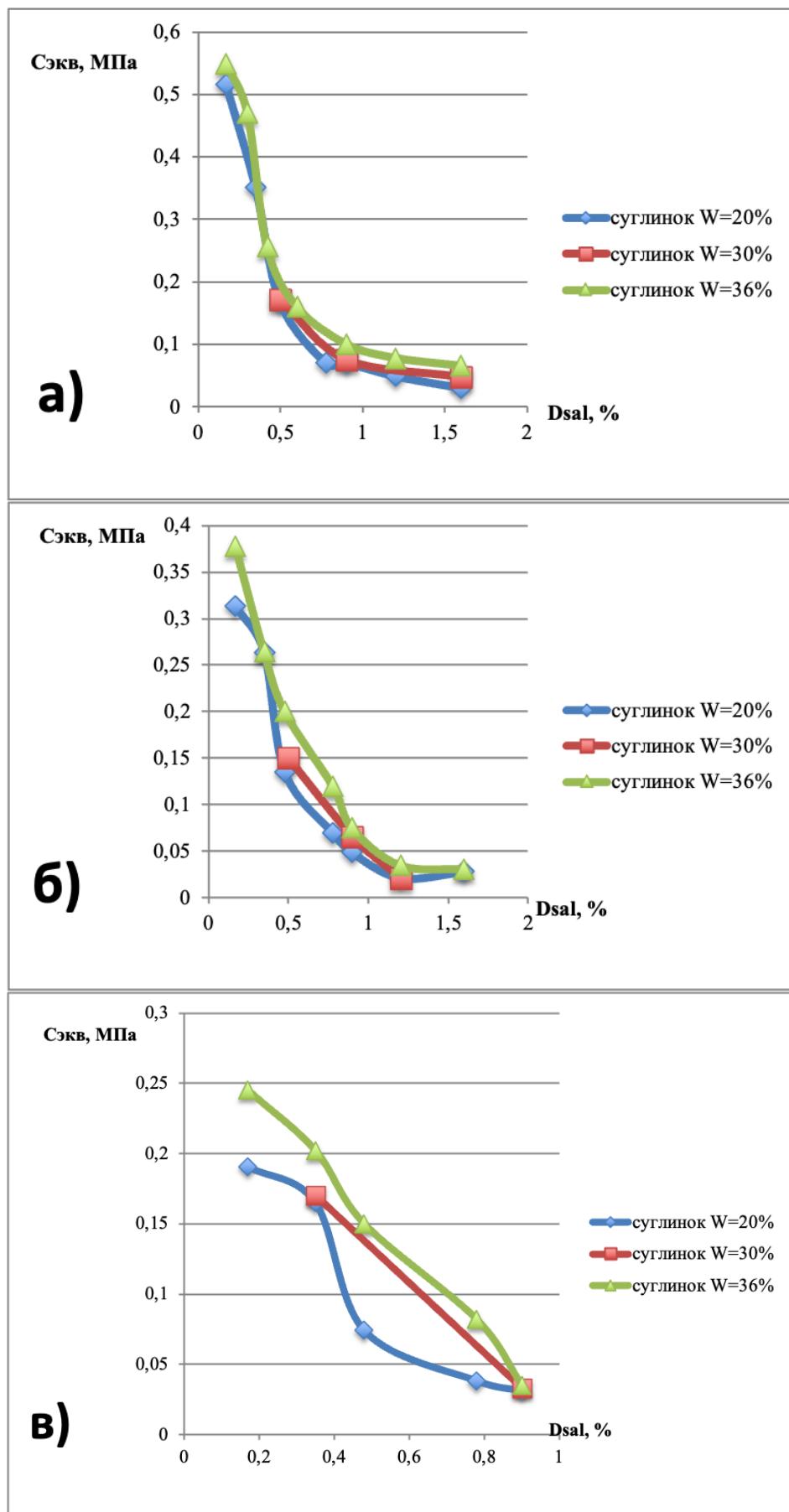


Рисунок 3.3. Графики зависимости эквивалентного сцепления от степени засоленности в суглинках при температуре: а)  $-6^{\circ}\text{C}$ . б)  $-4^{\circ}\text{C}$  в)  $-2^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2 Электрические и акустические свойства мерзлых засоленных грунтов

#### *Электрические свойства*

Измерение скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления в образцах разных влажностей и засоленностей при различных температурных условиях позволяет определить закономерность формирования и изменения этих геофизических параметров.

Засоленность оказывает существенное влияние на величину удельного электрического сопротивления, понижая его. При этом тип засоления играет важную роль: при морском засолении ( $\text{NaCl}$ ) фазовые переходы в грунте протекают гораздо медленнее, это объясняется тем, что температура эвтектики для  $\text{NaCl}$  в десятки раз ниже (Зыков, 2007).

На рисунке 3.4 представлен график зависимости УЭС от степени засоленности для песка: с увеличением засоленности сопротивление стремительно падает. При значительной засоленности УЭС мерзлого грунта падает до первых единиц Ом·м.

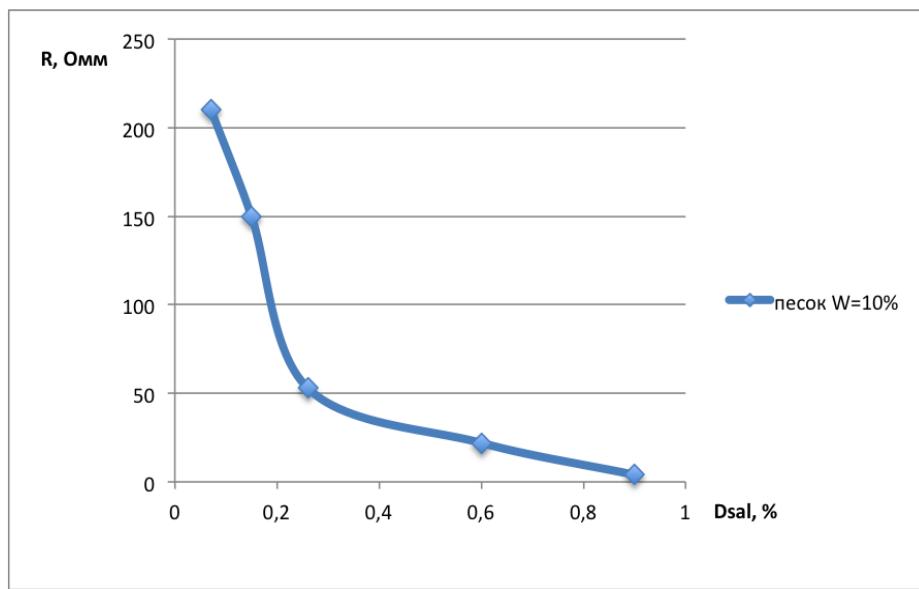


Рисунок 3.4. Зависимость удельного электрического сопротивления от степени засоленности для песков с  $W=20\%$  при  $T=-6^{\circ}\text{C}$ .

При уменьшении температуры величина удельного электрического сопротивления увеличивается. Наибольшие значения УЭС получены при наименьшей температуре исследования  $-6^{\circ}\text{C}$  в образцах песка с влажностью 19% и в образцах суглинка 36% (то есть при наибольших влажностях, заданных для этих грунтовых разностей в рамках исследования).

Максимальное сопротивление 210 Ом·м определено в песках с наибольшей влажностью (19%) и наименьшей засоленностью (0,07%). В песке отсутствует незамерзшая вода, поэтому вся влага полностью переходит в лед.

Если сравнить пески и суглинки с аналогичными показателями влажности и засоленности (пески  $W=19\%$  с  $D_{\text{sal}}=0,6$  и  $0,9\%$  и суглинки  $W=20\%$  с  $D_{\text{sal}}=0,48$  и  $0,9\%$ ), то суглинки будут обладать меньшим сопротивлением (44 и 15 Ом·м для песка и 40 и 10 Ом·м для суглинка). Это связано с тем, что из-за большей дисперсности суглинки содержат в себе незамерзшую воду.

При максимальных засоленостях ( $1,6\%$  для суглинка и  $0,9\%$  для песка) значение УЭС опускается до первого десятка Ом·м. Этот момент очень важен, так при интерпретации данных УЭС принято считать, что мерзлые грунты являются выскоомными, но как показывает исследование большие значения засоленности могут понижать значения УЭС мерзлых грунтов до талых.

### *Акустические свойства*

С увеличением засоленности температура начала замерзания понижается и вместе с тем увеличивается содержание незамерзшей воды и понижается содержание льда, а как известно, скорость продольных волн в воде в несколько раз ниже, чем во льду, поэтому акустические свойства понижаются.

На рисунке 3.5 представлен график зависимости скорости продольных волн от степени засоленности для образцов суглинка с разными влажностями при температуре  $-6^{\circ}\text{C}$ . При одинаковой небольшой засоленности величины скоростей примерно равны для всех образцов. С повышением засоленности скорость продольных волн значительно падает в образцах с меньшей

влажностью. При максимальной засоленности кривые снова встречаются практически в одной точке, как и в начале.

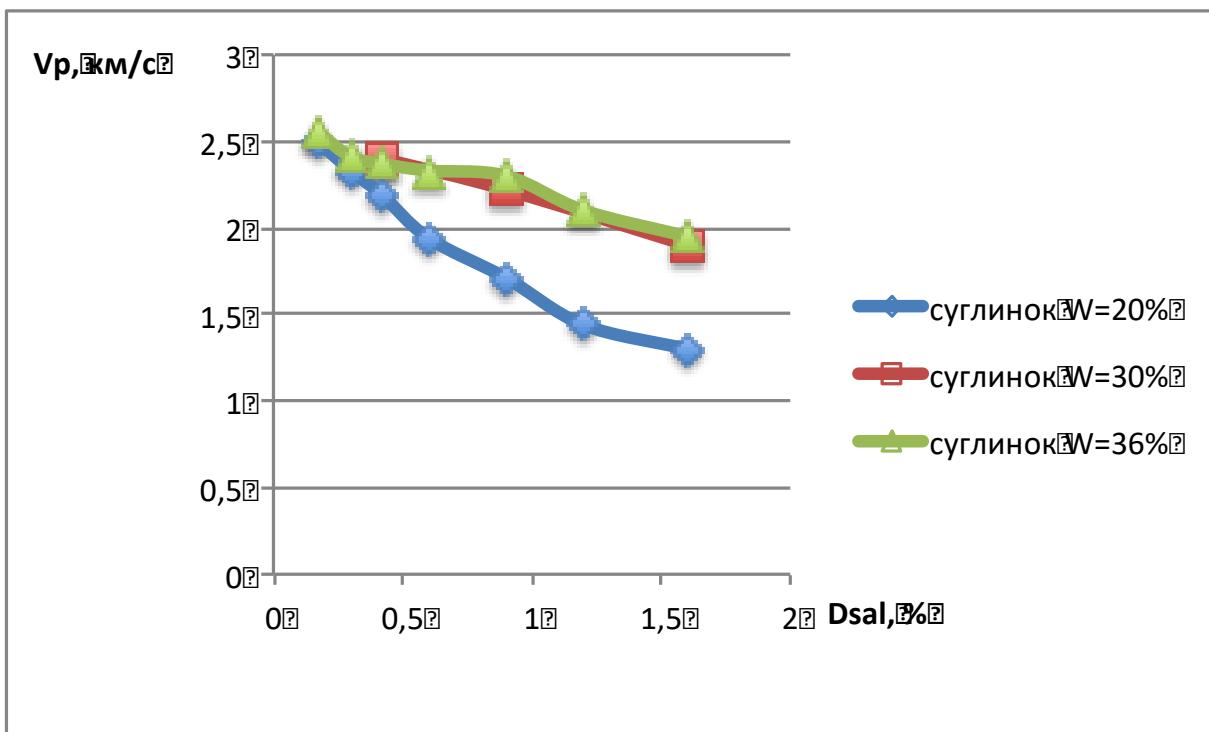


Рисунок 3.5. Зависимость скорости продольных волн от степени засоленности и влажности в суглинках при температуре  $-6^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, при минимальных и максимальных засоленностих фактор влажности в образцах нивелируются, при этом для средних значений засоленности скорости продольных волн ощутимо выше в образцах с большей влажностью.

Проведены измерения скорости продольных волн при трех различных температурных режимах:  $-2$ ,  $-4$  и  $-6^{\circ}\text{C}$ . Всего выполнено 90 измерений при температурах  $-6^{\circ}\text{C}$ , столько же выполнено при  $-4^{\circ}\text{C}$  и 60 измерений проведено при  $-2^{\circ}\text{C}$  (меньшее количество измерений связано с переходом образцов с высокими засоленностями в охлажденное состояние).

При температуре исследований  $-6^{\circ}\text{C}$  в образцах зафиксирована наибольшая скорость продольных волн ( $2,92$  км/с в песках и  $2,44$  км/с в суглинках). С повышением температуры скорость понижается, например, в песке ( $W=10\%$ ,  $D_{sal}=0,07\%$ ) при повышении температуры с  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-2^{\circ}\text{C}$

скорость продольных волн падает почти в 1,5 раза с 2,4 км/с до 1,77 км/с. Это связано с фазовым переходом влаги: уменьшением ледяной компоненты грунта и увеличение жидкой, а как известно в воде скорость продольных волн понижается.

Образцы с большей влажностью обладают большей скоростью  $V_p$ , так как имеют больший объем ледяной компоненты (рисунок 3.5). Степень засоленности является мощным фактором, с увеличением засоленности происходит заметное понижение скорости, например, с увеличением засоленности с 0,17% до 1,6% в ряду суглинков с влажностью 36% при температуре -6°C, скорость с уменьшается с 2,55 км/с до 1,55 км/с. Это связано с тем, что засоленность увеличивает содержание незамерзшей воды.

Если сравнить образцы песка и суглинка с близкими значениями влажности и засоленности, то это будут ряды с влажностями 19% (песок), 20% (суглинок) и засоленостями 0,6 и 0,9% (песок), 0,48 и 0,9% (суглинок). При температуре -6°C пескам соответствуют скорости 2 и 1,8 км/с, а суглинкам 1,94 и 1,71 км/с. Скорости в песках больше, так как влага в них полностью переходит в лед, а в суглинках остается связная незамерзшая вода.

### **3.3 Влияние засоленности на удельное электрическое сопротивление и скорость продольных волн**

Результаты статистической обработки геофизических параметров испытанных грунтов показали, что значение коэффициента вариации удельного электрического сопротивления в среднем составляет 8% (максимальное значение 30%), а скорости продольных волн — 3% (максимальное значение 20%). Все это свидетельствует о достаточно точной оценке измеряемых параметров. Наибольший разброс данных зафиксирован при температуре -2°C у засоленных грунтов, характеризующихся близостью интервала интенсивных фазовых переходов.

На рисунке 3.6 а) представлен пример зависимости удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн (рисунок 3.6 б)) мерзлых песка и суглинка от исходной 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 ( $T=-6^{\circ}\text{C}$ ). 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 льдоцементационных связей. Сравнение геофизических данных при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$  не проводилось, так как средне- и сильнозасоленные грунты находились в талом состоянии.

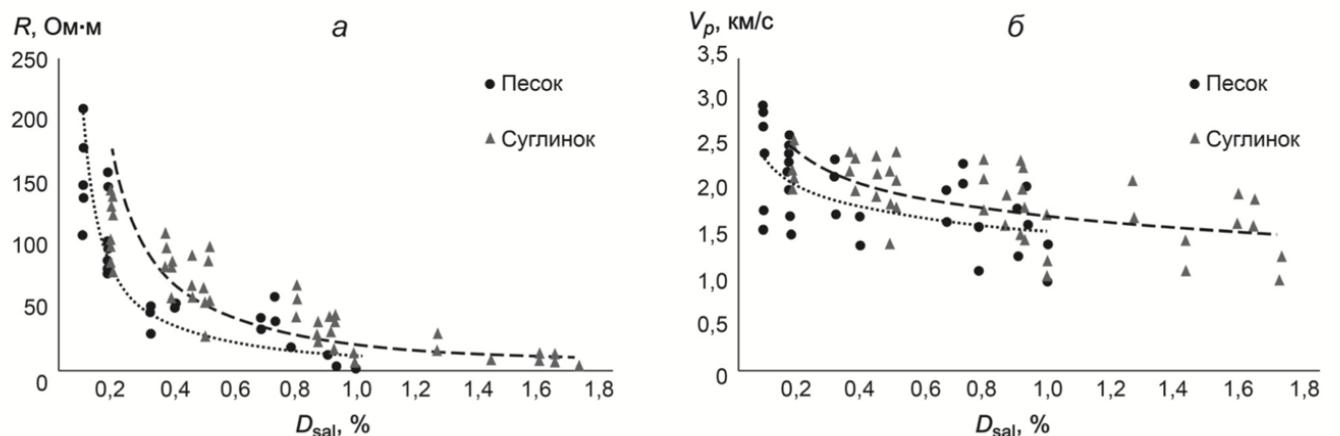


Рисунок 3.6. Зависимость удельного электрического сопротивления (а) и скорости продольных волн (б) от засоленности в грунтах при различных влажности и температуре.

Увеличение засоленности приводит к уменьшению вариации удельного электрического сопротивления, так как электрические свойства имеют ионную природу и в большей степени определяются концентрацией порового раствора (Liu et al., 2024). Так, для слабозасоленных песков уменьшение температуры от  $-2$  до  $-6^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению сопротивления примерно в

2 раза, а для сильнозасоленных песков не превышает 20%. Области возможных значений геофизических свойств скорости при повышении засоленности для исследуемых грунтов (суглинка и песка) частично перекрываются (особенно для скорости продольных волн).

Увеличение влажности мерзлого незасоленного суглинка приводит к увеличению УЭС и скорости продольных волн на 30%, а для сильнозасоленного суглинка увеличение влажности ведет к повышению удельного электрического сопротивления в 1,5–2 раза, а скорости продольных волн — на 30–40%.

Таким образом, наблюдается значительное отличие в закономерностях изменения удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн для незасоленных (слабозасоленных) и сильнозасоленных грунтов. Для незасоленных грунтов наибольшее влияние оказывает тип грунта и температура, а для засоленных — влажность и температура.

Основные факторы, обусловливающие отличие незасоленного и сильнозасоленного грунта, — их состав и строение. В засоленных грунтах цементирующая роль льда резко уменьшается за счет большого количества незамерзшей воды. По мере увеличения засоленности криогенные текстуры стремятся к сетчатому типу, а в дальнейшем — к нитевидным кристаллам льда и отдельным изометричным кристаллам (Hivon, 1995). При значительных значениях концентрации порового раствора криогенное строение различных по составу пород сближается, это определяющий фактор, влияющий на геофизические свойства.

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 (рисунок 3.7). 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. Таким образом, именно концентрация порового раствора является определяющим фактором при прочих равных условиях. В соответствии с СП 25.13330.2020 концентрация порового раствора  $C_{ps}$  связана с засоленностью соотношением:

$C_{ps} = D_{sal} / (D_{sal} + W_{tot})$ , где  $W_{tot}$  — суммарная влажность грунта, а  $D_{sal}$  — засоленность.

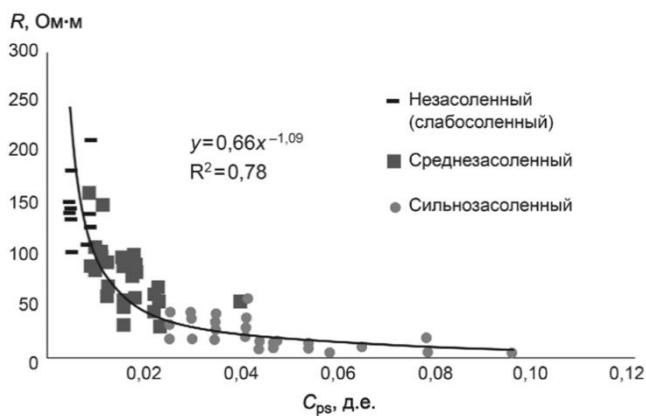


Рисунок 3.7. Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации порового раствора.

Концентрация порового раствора — симплексный показатель, который учитывает изменение влажности и засоленности, кроме того, значения влажности глинистых грунтов могут значительно превышать таковые у песчаных, т.е. опосредовано вводится поправка и на тип грунта. Как показали экспериментальные исследования, температура незначительно влияет на электрические свойства сильнозасоленных мерзлых грунтов

Минеральные частицы дисперсных грунтов, а также лед являются практически изоляторами. Преобладающее влияние на процессы электропроводности оказывают концентрация незамерзшего порового раствора и степень его распределения в объеме мерзлого грунта. Наиболее сильно на электропроводность мерзлых грунтов влияют легкорастворимые хлориды (сульфатно-карбонатное засоление грунтов слабее примерно в 15–20 раз) (Зыков, 2007).

Скорость продольных волн лучше всего коррелирует с симплексным параметром (отношение концентрации солей в поровом растворе к температуре испытаний) (рисунок 3.8). Анализ полученных мной 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 льдоцементационных 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%.

В таблице 3.1 указаны диапазоны изменения геофизических параметров слабозасоленных и сильнозасоленных грунтов. На основании этих данных можно сделать вывод, что наибольшее отличие характерно для электрических свойств грунтов (значения удельного электрического сопротивления могут уменьшаться в 2–22 раза). Если сравнить полученные значения с обобщенными данными акустических и электрических свойств, опубликованных в работе Фролова (2005), то некоторые значения геофизических параметров сильнозасоленных мерзлых грунтов соответствуют талым. Поэтому идентификация мерзлого состояния грунтов по этим параметрам (особенно без знания литологического состава и засоленности) может оказаться неоднозначной.

Таким образом, для более надежной и достоверной идентификации мерзлых засоленных грунтов необходимо применять дополнительные критерии (Скворцов, 2014) или проводить калибровку моделей. Эти данные особенно важны для геологической интерпретации геофизических данных при исследованиях деградации мерзлых грунтов на арктическом шельфе (Shakhova, 2017). Так, В.И. Аксеновым (2008) была предложена зависимость температуры начала замерзания от концентрации порового раствора на основе обобщения данных разных авторов. Поэтому, зная концентрацию порового раствора, которая определяется по данным измерений удельного электрического сопротивления, и температуру грунтов, можно однозначно определить состояние грунта (мерзлое и талое).

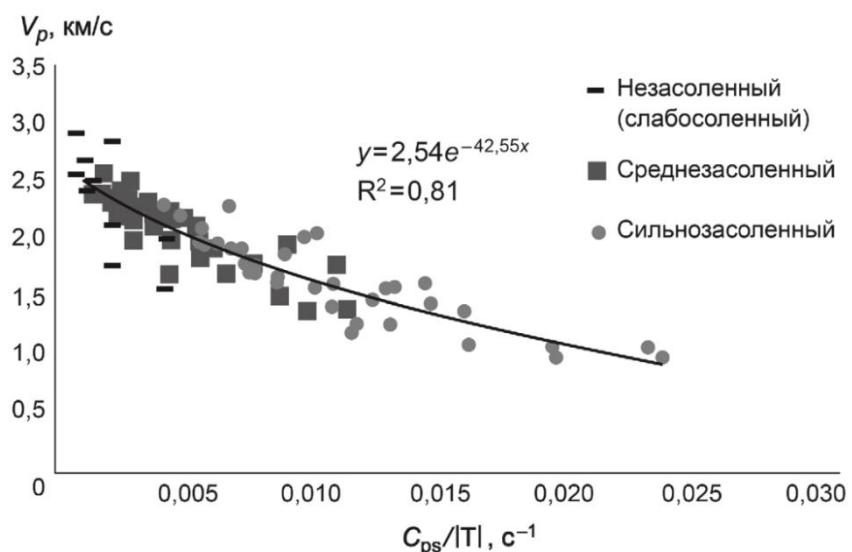


Рисунок 3.8. Зависимость скорости продольных волн от симплексного показателя в исследуемых грунтах.

Таким образом, значения скорости продольных волн и УЭС наиболее существенно зависят от концентрации порового раствора. Наиболее высокие значения этих характеристик соответствуют незасоленным и слабозасоленным мерзлым грунтам, наиболее низкие — сильнозасоленным; влияние гранулометрического состава, влажности и температуры грунтов, отмечаемое в незасоленных мерзлых грунтах, также сохраняется, однако

имеет подчиненный (по сравнению с влиянием засоленности) характер. При этом области возможных значений геофизических характеристик частично перекрываются для средне и сильнозасоленных мерзлых грунтов (таблица 3.1).

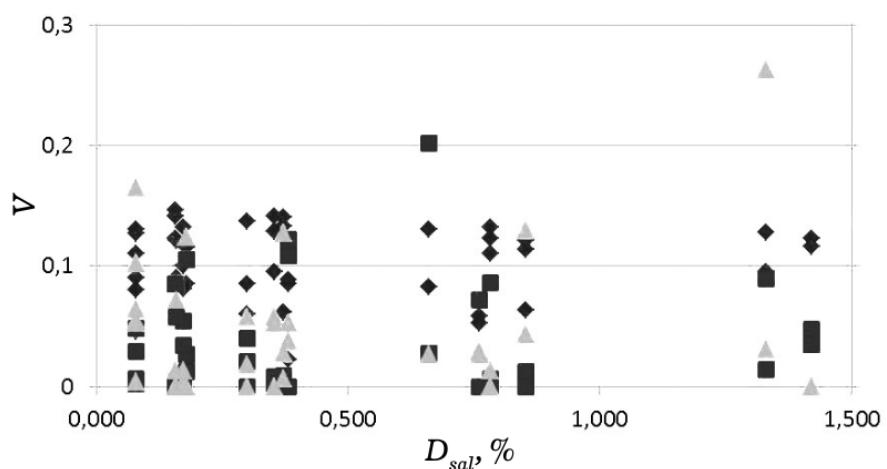
Таблица 3.1. Изменение скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления в зависимости от типа засоленности.

Тип грунта	Температура, °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

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.

### 3.4 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 (рисунок 3.9). Наибольшее отклонение (0,26) получено для удельного электрического сопротивления при температуре  $-2^{\circ}\text{C}$ . В среднем коэффициент вариации для геофизических параметров не превышает 0,05, а эквивалентного сцепления – 0,10. Обработка результатов испытаний показала, что при увеличении температуры от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-2^{\circ}\text{C}$  коэффициент вариации увеличивается в 1,5-2 раза, особенно для сильнозасоленных грунтов, что связано с близостью интервала интенсивных фазовых переходов. Результаты статистической обработки свидетельствуют о достаточно однородной выборке и возможности использования полученных данных для поиска корреляционных зависимостей. В дальнейшем использовались средние значения каждой характеристики.



Установлена хорошая взаимосвязь между эквивалентным сцеплением и удельным электрическим сопротивлением, а также скоростью продольных волн (рисунок 3.10). 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.

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.

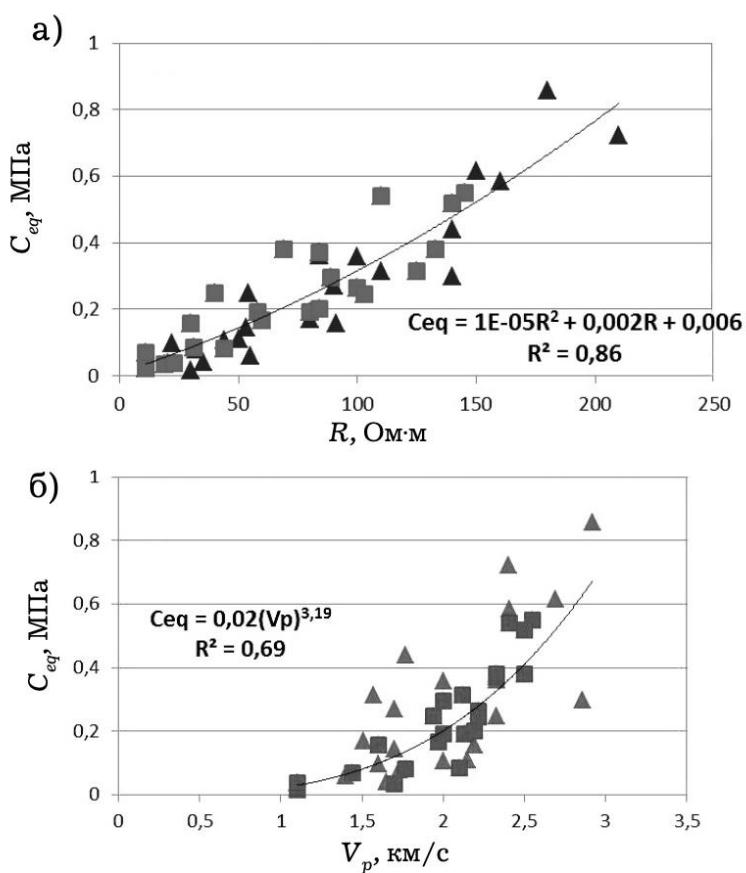


Рисунок 3.10 Зависимость эквивалентного сцепления от удельного электрического сопротивления (а) и скорости продольных волн (б) для модельных грунтов: песок (треугольник); суглинок (квадрат).

Проведенные исследования установили, что засоленность служит ключевым фактором, влияющим на электрические и акустические

характеристики грунтов. Влияние влажности, температуры и состава грунта проявляется в гораздо меньшей степени. Были установлены обобщающие параметры засоленности, которые лучше всего коррелируют с геофизическими параметрами (Koshurnikov, 2020).

Для удельного электрического сопротивления — это концентрация солей в поровом растворе ( $C_{ps}$ ). Для скорости продольных волн  $D_{sal} = C_{ps}/|T|$  — симплексный параметр ( $T$  — температура испытаний).

Анализ зависимостей эквивалентного сцепления  $C_{eq}$  и геофизических параметров от обобщающих симплексных характеристик (рисунок 3.11) показал, что именно удельное электрическое сопротивление может быть использовано для прогноза эквивалентного сцепления засоленных грунтов.

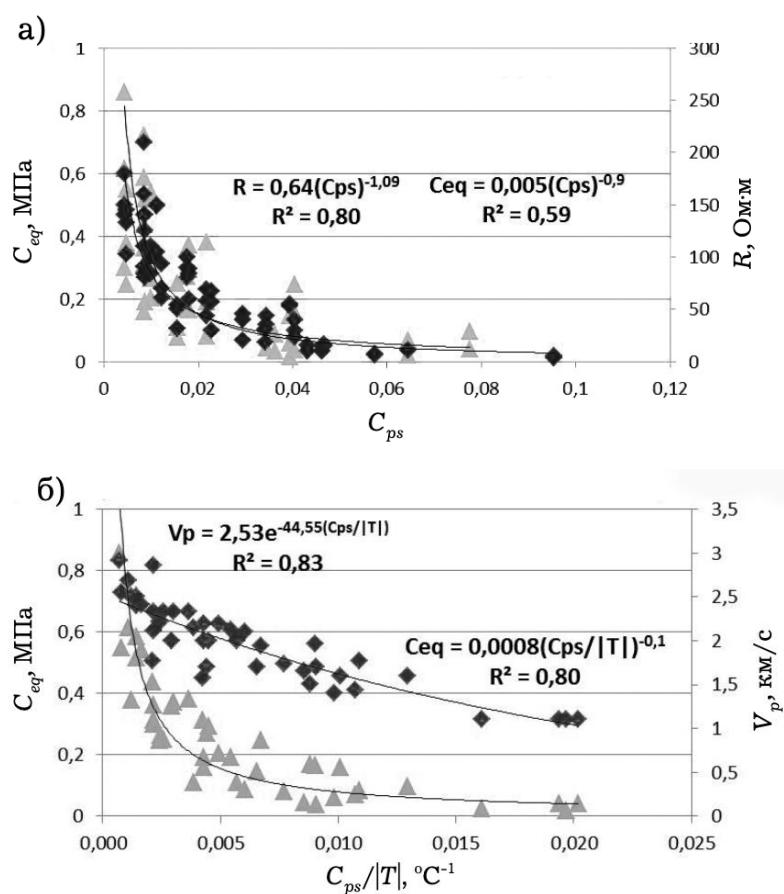


Рисунок 3.11. Зависимость эквивалентного сцепления  $C_{eq}$  (треугольник) от: а) удельного электрического сопротивления ( $R$ ) и концентрации порового раствора  $C_{ps}$ ; б) скорости продольных волн  $V_p$  (ромб) и симплексного показателя.

Прочностные характеристики мерзлых грунтов различаются в зависимости от вида испытаний, при которых они определялись: одноосное сжатие, трехосное сжатие, растяжение, кручение, сдвиг, шариковый штамп (Вялов, 2000), поэтому невозможно сравнивать корреляционные зависимости между геофизическими и прочностными характеристиками, полученными из разных типов испытаний. Но даже для одного вида испытания методика может быть разной. Например, для определения предела длительной прочности мёрзлых грунтов методом одноосного сжатия испытывается серия однотипных образцов под постоянной, но разной для каждого образца нагрузкой (ASTM D5520-94) или на одном образце – под ступенчато возрастающей нагрузкой (ГОСТ 12248.9-2020). Полученные значения при этом отличаются (Аксенов, 2016).

Результаты испытания шариковым штампом, также как и одноосного сжатия, используют для определения сопротивления нормальному давлению, которое необходимо для расчета несущей способности согласно СП 25 13330. 2020. Эквивалентное сцепление является информативной характеристикой, которая позволяет определять не только прочностные, но и несколько других параметров, используемых для расчетов (Roman et al., 2016; Роман, 2018). Однако, значения сопротивленияциальному давлению, рассчитанные по данным одноосного сжатия и шарикового штампа, также отличаются между собой.

При сравнении корреляционных зависимостей важно учитывать время проведения испытаний. Как известно, с течением времени происходит снижение прочности. Однако, при изучении взаимосвязи прочностных характеристик и геофизических свойств грунтов этот фактор практически не учитывался. Эквивалентное сцепление в зависимости от электрических свойств грунтов в разные моменты времени значительно отличается (рисунок 3.12).

Для расчета предельно-длительной прочности  $\sigma_t$  использовалась зависимость, предложенная для мерзлых грунтов С.С. Вяловым (Вялов, 1978):

$$\sigma_t = \beta \sigma^\infty / \ln(t + t^*/B), \quad (3.1)$$

где  $t^*$  — единичное время,  $t$  — прогнозное время,  $\beta$  и  $B$  — экспериментальные параметры.

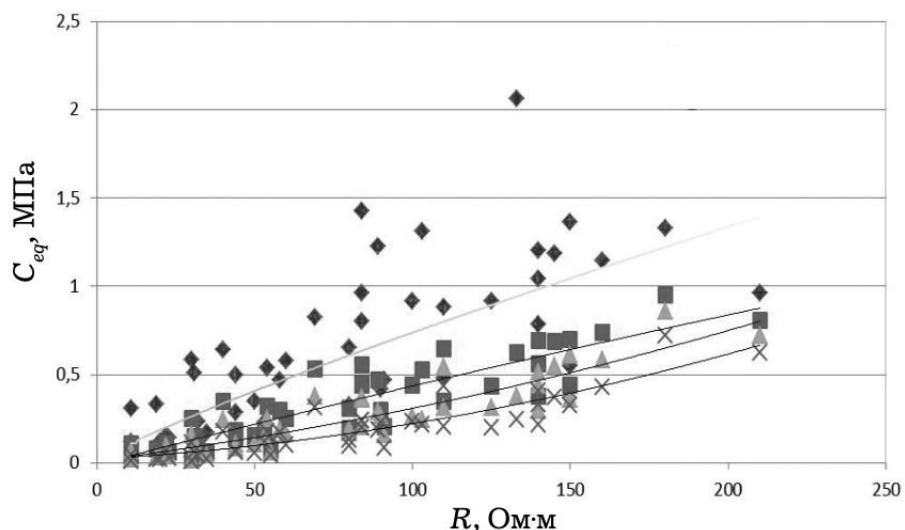


Рисунок 3.12. Зависимость эквивалентного сцепления модельных грунтов от удельного электрического сопротивления для модельных грунтов: 1 минута (ромб); 8 часов (квадрат); длительное (треугольник); предельно длительное (икс).

Эта зависимость подтверждена многочисленными опытными данными для всех прочностных показателей мерзлых грунтов (сопротивление сжатию, растяжению, сдвигу, сцепление) и получила широкое распространение в практике инженерного мерзлотоведения (Kotov et al., 2018; Zhang et al., 2016).

Согласно (3.1) прочность снижается беспрепятственно и кривая длительной прочности при  $t \rightarrow \infty$  асимптотически стремится к оси абсцисс, т.е.  $\sigma \rightarrow 0$ . Поэтому предел длительной прочности ( $\sigma_{t^\infty}$ ) можно рассматривать как

условный, соответствующий заданному времени до разрушения (100 лет), либо сроку службы сооружения:

$$\sigma_{t^\infty} = \beta / \ln(t_\infty / B), \quad (3.2)$$

где  $t_\infty$  – время, при превышении которого уменьшение прочности за 100 лет составит менее 3%.

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:

$$C_{eq}(T)/C_{eq}(T - n) = k R(T)/R(T - n), \quad (3.3)$$

где  $C_{eq}(T)$  и  $C_{eq}(T - n)$  – эквивалентное сцепление при самой низкой температуре и при повышении температуры на  $n$  град. 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 диапазона повышения температуры от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-4^{\circ}\text{C}$ , от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-2^{\circ}\text{C}$ , от  $-4^{\circ}\text{C}$  до  $-2^{\circ}\text{C}$ . Получено, что данные лучше всего описываются степенной зависимостью (рисунки 3.13, 3.14 и 3.15).

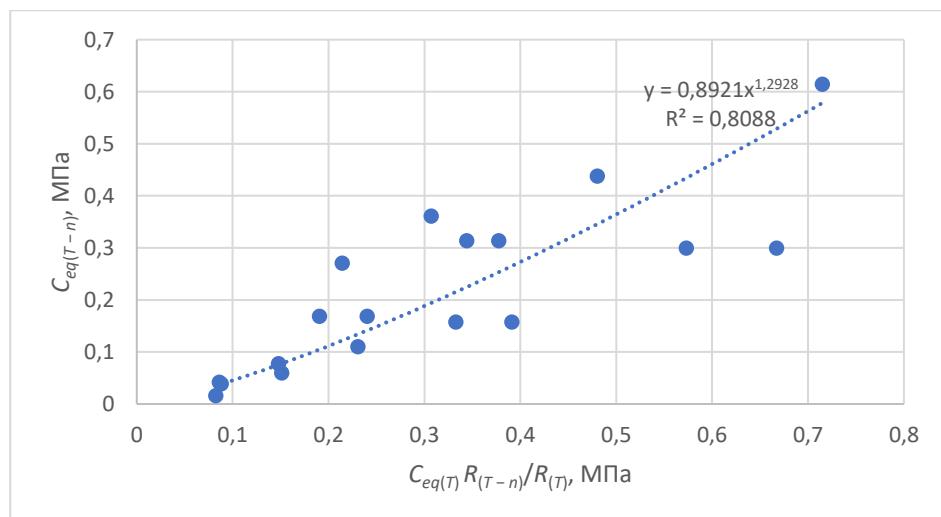


Рисунок 3.13 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для образцов песка.

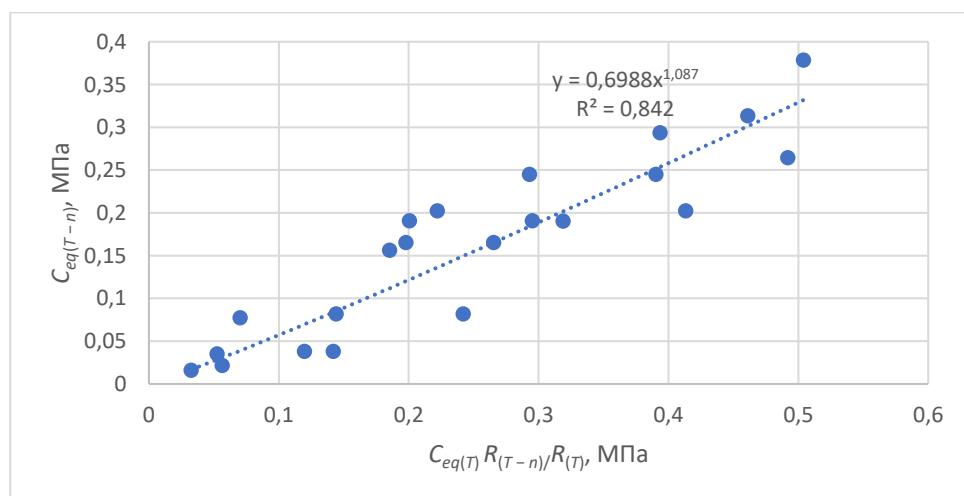


Рисунок 3.14 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для образцов суглинка.

Для песков (рисунок 3.13) и суглинков (рисунок 3.14) 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 рисунков 3.13 и 3.14 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 (рисунок 3.15):

$$C_{eq}(T - n) = 0,77(C_{eq}(T) R(T - n)/R(T))^{1,16}. \quad (3.4)$$

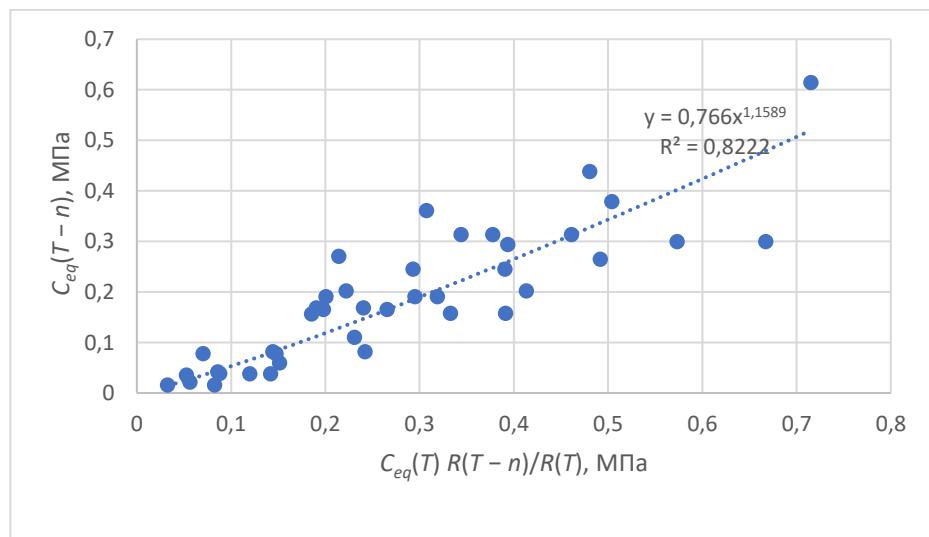


Рисунок 3.15 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для песков и суглинков.

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.

**Выводы.** В результате проведения экспериментальных исследований были найдены корреляционные зависимости между эквивалентным сцеплением и показателями удельного электрического сопротивления и скорости продольных волн.

Выявлено, что влияние засоленности превалирует над другими факторами (температура, состав грунтов, влажность). Однако с понижением температуры эта зависимость снижается. Наибольший коэффициент детерминации, характеризующий степень соответствия трендовой модели исходным данным для прогноза эквивалентного сцепления засоленных мерзлых грунтов, получен для удельного электрического сопротивления. Характеристики упругих свойств грунтов определяются, в основном, фазовым составом грунта, а электрические обусловлены проводимостью жидкой фазы и замкнутостью проводящих каналов, что является для засоленных грунтов определяющим фактором (Kotov et al., 2021).

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

Мерзлые грунты являются чрезвычайно сложным объектом исследования из-за их разнообразия по составу, строению, свойствам и взаимодействию составляющих их компонентов и фаз. Замерзание связанной воды в дисперсных грунтах происходит не при 0°C, как у свободной воды, а в широком диапазоне температур. Поэтому, согласно нормативным документам, определяется такая характеристика грунта как температура начала замерзания. Исследователи предложили несколько формул для расчета температуры начала замерзания на основе анализа большого количества опытов (таблица 3.2).

Таблица 3.2. Формулы для расчета температуры начала замерзания.

№	Формула	Автор
1	$T_{bf} = A - B(53C_{ps} + 40C_{ps}^2)$	СП 25.13330.2020
2	$T_{bf} = 3.36 * C/C_m$	Зыков Ю.Д.
3	$T_{bf} = 46,9 C_{ps} - 0,2$	Аксенов В.И.
4	$T_{bf} = \{1,86 \sum m_i i + T_{bf_p}\}$	Роман Л.Т.

Примечание: где  $T_{bf}$  – температура начала замерзания,  $C_{ps}$  – концентрация порового раствора (д.е.), А - коэффициент, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта; В - коэффициент, зависящий от типа засоления грунта, С - концентрация порового раствора (г/л),  $C_m$  - концентрация одномоляльного раствора;  $m_i$  – моляльность грунтового раствора, обусловленная содержанием  $i$ -ой соли; определяется в зависимости от концентрации порового раствора ( $C_{ps}$ ) и молекулярного веса соли;  $i$  – изотонический коэффициент для  $i$ -ой соли (табличное значение для каждой соли);  $n$  – количество солей, содержащихся в грунтовом растворе;  $T_{bf_p}$  – температура начала замерзания незасоленного грунта.

Анализ этих формул показывает, что температура начала замерзания 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 расчета концентрации порового раствора:

$$C_{ps} = 0,32 \rho^{-0,72}, \quad (3.5)$$

$$C_{ps} = |T|0,032 V_p^{-2,84}, \quad (3.6)$$

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

При этом измерения проводились на грунтах (песок и суглинок), которые были описаны в статье Кошурникова А.В. (Koshurnikov, 2020). Однако, были заданы характеристики свойств, которые не использовались для получения уравнений (3.5) и (3.6). Песок с влажностью 14% и засоленностью 0,15%, 0,26%, 0,9%, суглинок с влажностью 26% и засоленностью 0,42%, 0,9%, 1,6%.

Расчеты температуры начала замерзания проводились с использованием формулы (1) 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 (3.5) (2 вариант);
3. по данным измерения скорости продольных волн и температуры грунта с использованием формулы (3.6) (3 вариант);
4. экспериментальные значения температуры начала замерзания (эксперимент).

Для варианта 2 и 3 коэффициент А формулы (1), 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 3.16.

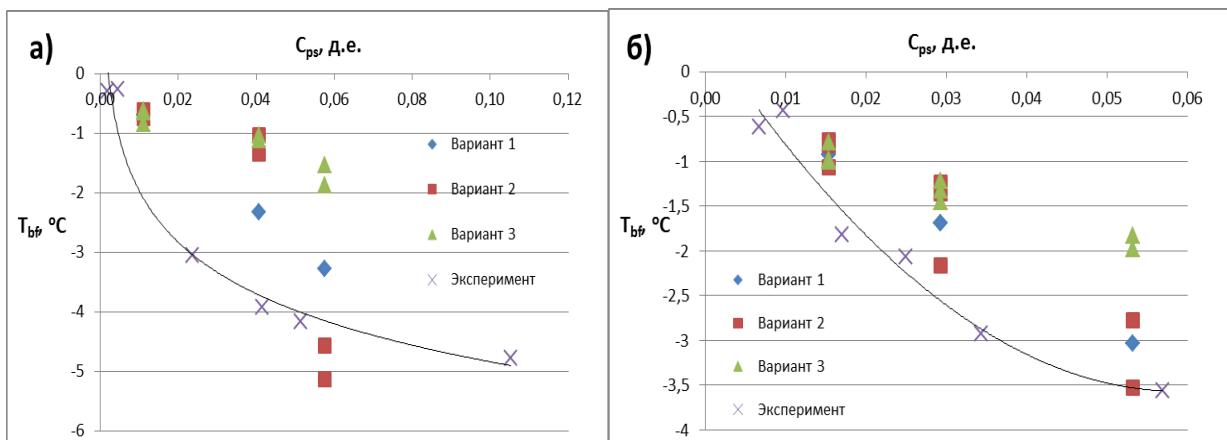


Рисунок 3.16 Зависимость температуры начала замерзания от концентрации порового раствора при разных вариантах расчета для песка (а), суглинка (б) (Agapkin et al., 2021).

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.

### **3.6. 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.

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. Несколько расчетных формул приведено в таблице 3.3, в том числе формула, рекомендованная СП 25.13330.2020 с учетом влияния засоленности. В других формулах влияние засоленности учитывается через введение температуры начала замерзания, которая определяется экспериментально.

Таблица 3.3. Формулы для расчета влажности незамерзшей воды.

№	Формула	Автор
1	$W_w = \kappa_w W_p + \eta D_{sal}$	СП 25.13330.2020
2	$W_w = \alpha  T ^\beta$	Anderson D.M.

№	Формула	Автор
3	$W_w = W_{tot} \left  1 - \ln \left[ \frac{T / T_{bf}}{0.72T / T_{bf} + 5.3} + 1 \right] \right $	Роман Л.Т.
4	$W_w = (W_p / 4) + (W_{tot} - W_p / 4) T_{bf} / T$	Шейкин И.В.
5	$W_w = W_{tot} - (V_{H(t=0)} - V_{(t=i)}) \frac{(W_{tot} - W_g(t=-24))}{(V_{H(t=0)} - V_{(t=-24)})}$	Кальбергенов Р.Г., Зыков Д.Ю.
6	$W_w = A V_p + B$	LI Dongqing

Примечание: где  $W_w$  – содержание незамерзшей воды,  $\kappa_w$  – коэффициент зависящий от числа пластичности и температуры,  $W_p$  – влажность грунта на границе пластичности,  $\eta$  – 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  $t = -24^\circ\text{C}$ ,  $V_{H(t=0)}$  – скорость продольных волн  $t=0^\circ\text{C}$ ,  $V_{(t=i)}$  – скорость продольный волн при  $i$ -той температуре,  $V_{(t=-24)}$  – скорость продольных волн при  $t = -24^\circ\text{C}$ ;  $T_{bf}$  – температура начала замерзания, Т – интересующая температура мерзлого грунта.  $\alpha$  и  $\beta$  - эмпирические параметры, зависящие от удельной поверхности частиц

Таким образом, необходимо совершенствование современных методик, а также разработки экспериментальных экспресс-методов определения фазового состава влаги в мерзлых породах. При этом особенно важно оценивать содержание незамёрзшей воды при проведении крупномасштабных полевых исследований в области распространения засоленных мерзлых грунтов, которые обладают высокой деформацией и низкой несущей способностью.

В результате проведенных исследований были получены кривые незамерзшей воды для всех исследуемых образцов (с образца №1 по №4). При этом для каждого образца приведено 3 кривые (рисунок 3.17):

1. по данным расчета по формуле (2.10) (вариант 1);
2. по данным расчета по формуле (2.9) на основе измерений скоростей продольных волн при разных температурах (вариант 2);
3. экспериментальные значения влажности незамерзшей воды, определенные контактным методом (эксп.).

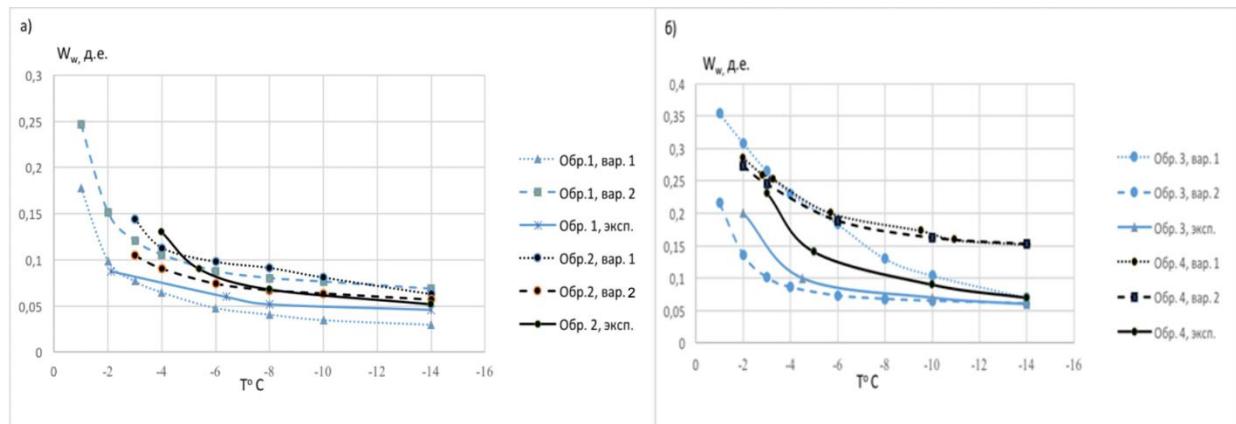


Рисунок 3.17. Зависимость влажности незамерзшей воды при разной отрицательной температуре для супеси (а), глины (б) (Agapkin et al., 2021).

Для образца супеси с засоленностью 0,25% (образец 1) значение влажности незамерзшей воды, полученное расчетным методом по формуле (2.10), несколько занижено, а по формуле (2.9) наоборот заметно выше относительно результатов, полученных контактным методом. Обратная закономерность выявлена для супеси с высокой засоленностью (образец 2). Кривая, полученная по данным расчета по формуле (2.9), значительно ниже, чем кривая, полученная контактным методом.

Такой разброс можно объяснить фактором засоленности, который усложняет процессы фазовых переходов при относительно невысоких отрицательных температурах. Для образца глины с засоленностью 0,4% (образец 3) кривая незамерзшей воды, полученная контактным методом снизу практически совпадают с кривой, полученной расчетом по формуле (2.9). А значения, полученные расчетом по формуле (2.10), значительно отличаются

от экспериментальных данных. Для глины с засоленностью 0,89% (образец 4) оба расчетных метода показали данные значительно превышающие значения, полученные экспериментальным методом.

### **3.7 Возможность применения разработанных методик при инженерно-геологических изысканиях**

Многие исследователи подчеркивают значимость прямой взаимосвязи между содержанием незамерзшей воды и механическими свойствами засоленных мерзлых пород (Роман и др., 2018; Хрусталев, 2019). Повышение степени засоленности мерзлых грунтов приводит к снижению величины эквивалентного сцепления. Это связано с увеличением толщины слоя незамерзшей воды в порах, вызванным повышением содержания солевого раствора. Увеличенная толщина незамерзшей воды ослабляет силы трения и сцепления между минеральными частицами и кристаллами льда, способствуя их взаимной изоляции. В результате, прочность мерзлого грунта преимущественно определяется структурными связями ледяных включений, образующих каркас в порах (Брушков, 1998).

Снижение температуры вызывает уменьшение толщины пленок незамерзшей воды, что, в свою очередь, способствует росту прочностных характеристик засоленных мерзлых грунтов. Данный эффект объясняется интенсификацией структурных связей на контактах «грунтовые частицы – кристаллы льда», вклад которых в общую прочность материала становится доминирующим.

Исследования Акимова, Боголюбова, Аксенова, Зыкова, Брушкова и многих других показали, что минерализация поровой влаги оказывает существенное влияние на удельное электрическое сопротивление (УЭС)

мерзлых пород, поскольку проводимость мерзлых грунтов в большей степени определяется проводимостью порового раствора (Аксенов, 2008). Вследствие этого, электроразведка является наиболее перспективным методом для исследования засоленных мерзлых грунтов, так как УЭС является параметром, чувствительным к изменениям засоленности пород. Это объясняется тем, что засоленность влияет на скорость распространения упругих волн лишь косвенно – через содержание незамерзшей воды. Наличие льда в мерзлых породах как породообразующего минерала приводит к изменениям электрических свойств пород. Эти свойства демонстрируют широкий диапазон изменения в результате сложного взаимодействия незамерзшей воды с минеральным скелетом и льдом (Фролов, 2005).

Проведенные измерения УЭС и скорости продольных волн показали, что при увеличении степени засоленности мерзлых грунтов сопротивление может снижаться в 2-22 раза, в то время как скорость продольных волн уменьшается не более чем в 2 раза (таблица 3.1). Экспериментальные исследования Мозгановой (1991) также подтверждают значительный диапазон изменения УЭС засоленных мерзлых грунтов и охлажденных пород, достигающий 3-4 порядков (Аксенов, 2008). Полученные результаты указывают на высокую чувствительность УЭС к изменению засоленности мерзлых грунтов, что делает электроразведку перспективным методом для изучения этих геологических объектов.

В работе Червинской проведены исследования корреляции скорости продольных волн и величины эквивалентного сцепления для песчано-глинистых мерзлых засоленных грунтов Ямала с массивной криогенной текстурой (Chervinskaya et al., 1998). Важно отметить, что рассмотрены высокие концентрации порового раствора в диапазоне от 0,0005 до 0,02 д.е., которые не согласуются с классификацией ГОСТ 25100-2020 по степени засоленности. Для сравнения в текущей работе исследования проведены при концентрациях не превышающих 0,0008 д.е. На рисунке 3.18 приведено сравнение графиков корреляции значений эквивалентного сцепления и

скорости продольных волн из работы Червинской и текущего исследования. В обоих исследованиях коэффициенты корреляции 0,83 и 0,78 достаточно близки друг к другу и свидетельствуют о наличии высокой положительной корреляции между исследуемыми переменными. При этом в текущей работе рассмотрены более низкие величины концентрации порового раствора, согласующиеся с классификацией ГОСТ.

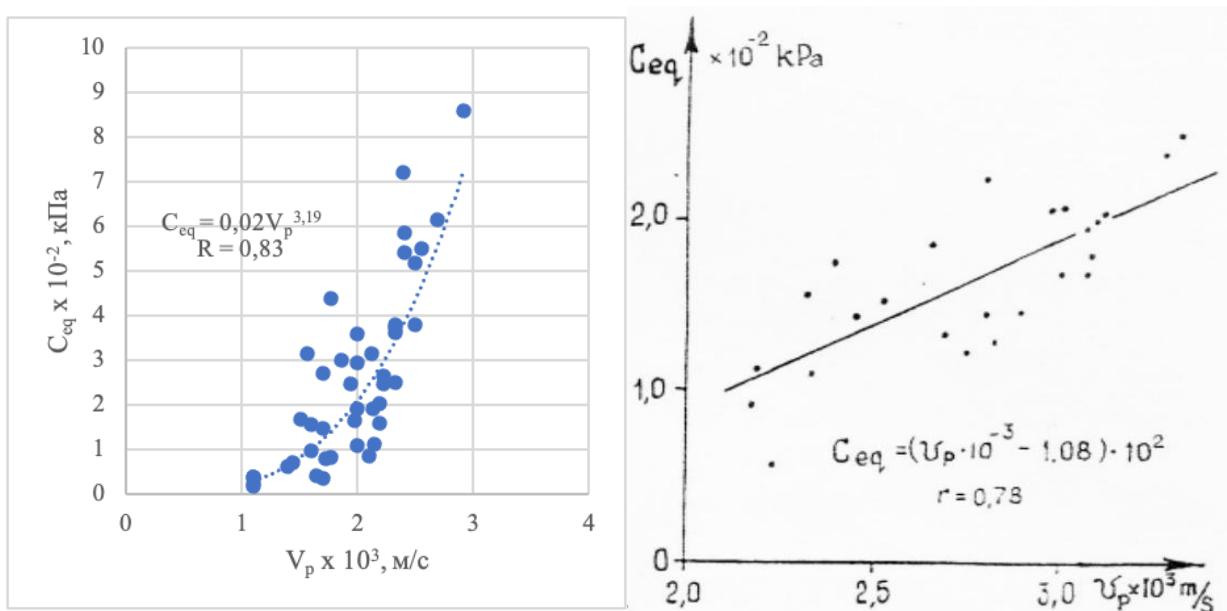


Рисунок 3.18 Сравнение графиков корреляции между значениями эквивалентного сцепления и скорости продольных волн из текущего исследованием (слева) и исследованием Червинской (1998) (справа).

Сравнительный анализ корреляционных зависимостей между геофизическими параметрами и показателями свойств грунта показал, что наиболее точная оценка величины эквивалентного сцепления достигается при использовании УЭС (рис. 3.11). Сопоставление методик оценки температуры начала замерзания, основанных на измерениях скорости продольных волн и УЭС, также продемонстрировало более высокую корреляцию с результатами, полученными методом Микро-ВЭЗ (рис. 3.16). Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что электrorазведка является более эффективным методом для изучения мерзлых засоленных грунтов, что

согласуется с результатами других исследователей. При этом акустические измерения пригодны для оценки содержания незамерзшей воды.

Оценка величин эквивалентного сцепления, содержания незамерзшей воды и концентрации порового раствора, проведенная на основе данных лабораторных геофизических измерений УЭС и скорости продольных волн, продемонстрировала близкую степень соответствия с результатами, полученными прямыми методами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что точность оценки по данным геофизических измерений указанных параметров сопоставима с точностью косвенных расчетных методов, предложенных в СП 25.13330.2020.

Исследования были проведены на модельных грунтах массивной криогенной текстуры. Предложенные оценочные методики требуют валидации на натурном массиве. При этом важно отметить, что измерения УЭС с помощью установки Микро-ВЭЗ проводились при частотах, которые обычно используют при работе в полевых условиях.

Таким образом, сейсмоакустические методы и методы электроразведки, применяемые в настоящее время, предоставляют обширный набор данных о состоянии криолитозоны, включая информацию о литологии, геокриологическом строении, расположении грутовых вод, составе и свойствах грунтов.

Для более точного определения физико-механических свойств мерзлых засоленных грунтов необходимо объединить результаты геофизических измерений с геотехническими полевыми исследованиями и определением УЭС и скоростей продольных волн в лабораторных условиях при инженерно-геологических изысканиях (Котов и др., 2023; Li et al., 2024).

Необходимо отметить, что корреляционные зависимости между УЭС, скоростями упругих волн и физико-механическими свойствами мерзлых засоленных грунтов, используемые в инженерных расчетах, могут иметь высокую степень неопределенности и разброса. Для снижения этой неопределенности целесообразно комбинировать сейсмоакустические методы

с результатами геотехнических исследований, данными бурения и лабораторными исследованиями для конкретных участков (Котов и др., 2023).

Благодаря широкой зоне охвата и возможности оперативного сбора данных, методы электроразведки и сейсмоакустические методы могут предоставить значительно больший объем информации при меньшей затрате времени и экономических ресурсов.

Важно подчеркнуть, что геофизические методы не могут полностью заменить стандартный набор методов инженерной геологии. Однако, их планомерное развитие и применение в комплексе с другими методами позволяют значительно улучшить существующие подходы к изучению и оценке свойств грунтов криолитозоны.

## Основные выводы работы

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 мёрзлого 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 требуется дальнейшие натурные исследования на грунтах ненарушенного сложения.

## Список литературы

1. Аксенов В.И. Исследование механических свойств мерзлых засоленных грунтов как оснований сооружений (на примере грунтов Арктического побережья). Автореф. диссер. канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1980. 23 с.
2. Аксенов В.И. Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М.: Все в мире строительства, 2008. 361 с.
3. Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерицкий К.В., Дорошин В.В. Сопоставление результатов испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие при ступенчатой и постоянной нагрузках // Альманах, Пространство и время. 2016. Т. 11. Вып. 1: Система планета Земля.
4. Баженова А.П. Инструктивные указания по лабораторным методам определения температуры переохлаждения и начала замерзания грунтов. Сб.2, Изд.АН СССР, 1954.
5. Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождения и свойства. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 330 с.
6. Велли Ю.Я., Гришин П. А. О несущей способности засоленных вечномерзлых грунтов. // Труды Союzmор НИИпроекта. М.: 1963. №3.
7. Веретехина Э.Г. Закономерности формирования деформационных свойств пластичномерзлых грунтов в условиях повышения температуры и увеличения засоленности. Автореферат дис. кандидат. геол.миннера. наук. М.: 2002. 21 с.
8. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). Санкт-Петербург, 2008. — 300с.
9. Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне // Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.
10. Вялов С.С., Цытович Н.А. Оценка несущей способности связных

- грунтов по величине вдавливания сферического штампа. / Докл. АН СССР 1956. Т. 111, № 6. С. 1193–1196.
11. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978, 447 с.
12. Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
13. Гончаров Б.В., Хазин Б.Г. О применении ультразвука к оценке прочности мерзлых грунтов при их разработке (1973). Основания фундаменты и механика грунтов №2, с.16-19.
14. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Стандартинформ, 2013, 16 с.
15. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2019, 19 с.
16. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 36 с.
17. ГОСТ 12248.7-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом испытания шариковым штампом. М.: Стандартинформ, 2020, 14 с.
18. ГОСТ 12248.8-2020. Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. М.: Стандартинформ, 2020, 11 с.
19. ГОСТ 12248.9-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости мерзлых грунтов методом одноосного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020, 18 с.
20. ГОСТ 12248.10-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости мерзлых грунтов методом компрессионного сжатия. М.: Стандартинформ, 2020, 10 с.
21. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2021. 22 с.

- 22.Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР. // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений» М.: «НАУКА». 1990. С. 3 – 9.
- 23.Зыков Ю.Д., Рождественский Н.Ю., Червинская О.П. Упругие и электрические свойства сильнольдистых мерзлых пород и льда//Проблемы геокриологии. - М.: Наука, 1983. - С. 118-127.
- 24.Зыков Ю.Д., Червинская О.П. Акустические свойства льдистых грунтов и льда. М.: Наука, 1989. 129 с.
- 25.Зыков Ю.Д. Определение физико-механических свойств мерзлых песчано- глинистых грунтов комплексом геофизических методов: Автореф. докт. дисс. М., 1992.
- 26.Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М., 2007. — 272с.
- 27.Иванова Л.Г. Влияние засоленности и заторфованности на деформационные свойства мерзлых грунтов. Автореферат дис. кандидат. геол.миннер. наук. М.: 1997. 21 с.
- 28.Истомин В.А., Чувилин Е.М., Махонина Н.А., Буханов Б.А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды по потенциалу влаги // Криосфера Земли. Т. 13, №2, 2009. С. 35-43.
- 29.Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля М., Л.: Изд-во АН СССР, 1944. Т. 8, вып. 3. С. 201 –224.
- 30.Карпунина А.А. Исследование физико-химических свойств мерзлых засоленных грунтов для инженерных изысканий / Автореф. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М.: 1974. 21 с.
- 31.Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003. 608 с.
- 32.Комаров, И. А. Методика прогноза теплофизических характеристик засоленных пород и криопэгов в процессе их криогенного

метаморфизма (программный продукт, инженерные соотношения, нормативные технические документы) / И. А. Комаров // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки изыскательских организаций, Москва, 11–14 декабря 2018 года. – Москва: ООО «Геомаркетинг», 2018. – С. 248-252. – EDN YZVZCX.

- 33.Комаров, И. А. Проблемы прогноза свойств засоленных мерзлых пород и интенсивности протекания в них мерзлотных процессов / И. А. Комаров // 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. 11-48. – EDN YSNDYX.
- 34.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.
- 35.Кривов Д.Н. Закономерности деформирования и разрушения мерзлых засоленных грунтов района Большеземельской тундры. Автореферат дис. кандидат. геол.миннера. наук. М.: 2009. 23 с.
- 36.Лискун И.Г. Эоплейстоцен межгорных впадин Центральной Азии. М., Наука. 1975. 171 с.
- 37.Методы геокриологических исследований. / Под ред. Ершова Э.Д. М.: Изд-во МГУ, 2004 - 512 с.
- 38.Мотенко Р.Г. Термофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых засоленных дисперсных пород. Автореф. Дисс. Канд. Геол.-мин наук. М.: 1997. 24 с.

39. Налетова Н.С. Массоперенос и криогенное структуро- и текстурообразование в промерзающих засоленных породах. Автореферат кандидатской диссертации. М, МГУ, 1996, 23 с.
40. Нерадовский Л.Г. Научно-методические основы изучения мерзлых грунтов слоя годовых теплооборотов методами электромагнитных зондирований. — Якутск, 2016 — 378с.
41. Ошкун А.Н. Многоволновая сейсморазведка. Ультразвуковые исследования в лаборатории. М., 2008. 33 с.
42. Павлова Н.А., Данзанова М. В. Геоэкологическая обстановка на урбанизированной территории Центральной Якутии // Экология урбанизированных территорий. 2018. №1.
43. Рекомендации по определению физико-механических свойств мерзлых дисперсных грунтов геофизическими методами. М.: Стройиздат, 1989. 32 с.
44. Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. М.: Наука, 1987. 220 с.
45. Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов / М.: МАИК "Наука/Интерperiодика", 2002. 425с.
46. Роман Л.Т., Царапов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С., и др. Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. М.: "Книжный дом "Университет", 2018. 188 с.
47. Свинтицкая Л.Ф. Влияние химического состава солей на прочность мерзлых грунтов. Автореферат дис. кандидат. геол.миннер. наук. М.: 1997. 20 с.
48. Скворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Сейсмические критерии идентификации мерзлого состояния горных пород // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, № 2. С. 83–90.
49. СНиП 2. 02. 04 – 88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

- М.: Госстрой СССР. 1990. 52с.
- 50.СП 25 13330-2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.  
М.: ФЦС, 2012. 52 с.
- 51.СП 446.1325800-2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Стандартинформ, 2019. 77с.
- 52.СП 25 13330-2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.  
М.: Стандартинформ, 2021. 110 с.
- 53.Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов.  
Пущино; 2005 — 607с.
- 54.Хрусталев Л. Н. Основы геотехники в криолитозоне. – 2019.
- 55.Цытович Н.А., Кроник Я.А., Маркин К.Ф., Аксенов В.И. Самуэльсон М.В. Физические и механические свойства засоленных грунтов. // Матер. I Междунар. конф по мерзлотоведению. Якутск. 1973. С. 40 - 51.
- 56.Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. Учебн. пособие. М., «Высш. школа», 1973. 448 с.
- 57.Чеверев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов / М.: Научный мир, 2004. 234 с.
- 58.Электроразведка методом сопротивлений / Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М., 1994.
- 59.Яркин А.Н. Особенности строительных свойств мерзлых засоленных грунтов как оснований сооружений. Автореф. дссер. канд. техн. наук. Л.: ЛИСИ. 1986. 25 с.
- 60.Aas G. Laboratory determination of strength properties of frozen salt marine clay. // Ground Freezing 2 –ed Symp. Troundheim. 1980. P/ 144 - 156.
61. Agapkin I.A., Kotov P.I. Velocities of longitudinal waves in frozen saline soils // 6th Scientific Conference. Tyumen, 2019. European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, 2019. Pp. 236-240.

62. 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 DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202150012>.
63. 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.
64. ASTM D5520-94. Standart Test Method for Laboratory Determination of Creep Properties of Frozen Soil Samples by Uniaxial Compression. Philadelphia: ASTM International Publisher, 2006. 9 p.
65. Carcione J.M., Seriani G. Seismic and ultrasonic velocities in permafrost // Geophys. Prosp. 1998. Vol. 46. P. 441–454.
66. Chervinskaya, O. P., A. D. Frolov, and Y. D. Zykov, 1998, On the correlation of elastic and strength properties for saline frozen soils: Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost: National Academy of Sciences, 139–141.
67. Christ M., Park J.B. Ultrasonic technique as tool for determining physical and mechanical properties of frozen soils // Cold Regions Science and Technology, 2009, No 58. Pp. 136-142.
68. Dafflon B., Hubbard S., Ulrich C., Peterson J., Wu Y., Wainwright H., & Kneafsey TJ. (2016). Geophysical estimation of shallow permafrost distribution and properties in an ice-wedge polygon-dominated Arctic tundra region. *Geophysics*, 81(1), WA247-WA263. <http://dx.doi.org/10.1190/GEO2015-0175.1>
69. Dou S., Nakagawa S., Dreger D., Ajo-Franklin J.B. An effective-medium model for P-wave velocities of saturated, unconsolidated saline permafrost // *Geophysics*. 2017. Vol. 82, N 3. P. EN33–EN50.

- 70.Fortier R., Allard M., Seguin M.K. Effect of physical properties of frozen ground on electrical resistivity logging // *Cold Reg. Sci. Technol.* 1994. Vol. 22, N 4. P. 361–384.
- 71.Hauck C., Böttcher M., Maurer H. A new model for estimating subsurface ice content based on combined electrical and seismic data sets // *Cryosphere*. 2011. Vol. 5. P. 453–468.
- 72.Huang X, Li DQ, Ming F, et al., 2013. An experimental study on the relationship between acoustic parameters and mechanical properties of frozen silty clay. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 5(5): 596–602. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2013.00596.
- 73.Hivon E. Behaviour of saline frozen soils. A Thesis submitted to the faculty of graduate studies and research fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Edmonton. Alberta. 1991.
- 74.Hivon E.G., Sego D.C. Distribution of saline permafrost in the Northwest Territories, Canada // *Canad. Geotechn. J.* 1993. Vol. 30. P. 506–514.
- 75.Hivon E.G., Sego D.C. Strength of frozen saline soils // *Canad. Geotechn. J.* 1995. Vol. 32, N 2. P. 336–354.
- 76.Ingeman-Nielsen T., Foged N.N., Jørgensen A.S. Geophysical investigation of saline permafrost at Ilulissat, Greenland // Proceed. of the 9th Intern. Conf. on Permafrost, Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. P. 773–778.
- 77.Jarvis, K. D., Knight, R. J., 2002. Aquifer heterogeneity from SH-wave seismic impedance inversion. *GEOPHYSICS*, 67 (5): 1548-1557.
- 78.Keuschnig M., Krautblatter M., Hartmeyer I., Fuss C., Schrott L. Automated Electrical Resistivity Tomography Testing for Early Warning in Unstable Permafrost Rock Walls Around Alpine Infrastructure // *Permafrost and Periglacial Processes* (2016) pp. 158-171.
- 79.Kezao Chen, Bowier J. M. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China. // *Palaeoecology*, 1986. N 54/ P. 87 – 101.

- 80.Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods for permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. Vol. 19. P. 157–178.
- 81.Koshurnikov A.V., Kotov P.I., Agapkin I.A. (2020) The influence of salinity on the acoustic and electrical properties of frozen soils // Moscow University Geology Bulletin, No 75, Pp. 97-104.
- 82.Kotov P. I., Tsarapov M. N., Green E., Stanilovskaya Y.V. Selection of equations for long-term strength calculation of frozen saline soils // 5th European Conference on Permafrost, 2018. Pp. 174-175.
- 83.Kotov P.I., Agapkin I.A. (2021) Correlation Between the Geophysical Parameters and Strength Characteristics of Frozen Soils of Various Salinity Levels. Soil Mech Found Eng 58, 41–47. <https://doi.org/10.1007/s11204-021-09704-4>
- 84.Kotov P. I., Stanilovskaya J. Y. V. Predicting changes in the mechanical properties of frozen saline soils //European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2022. – T. 26. – №. 12. – C. 5716-5728.
- 85.Lai, Yuanming et al. Present situation and prospect of mechanical research on frozen soils in China. // Cold Regions Science and Technology (2013) pp. 6-18.
- 86.Lai, Yuanming; Liao, Mengke; Hu, Kai. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory // International Journal of Plasticity (2016) pp. 84-113.
87. Lai YM, You ZM, Zhang J, 2021. Constitutive models and salt migration mechanisms of saline frozen soil and the-state-of-the-practice countermeasures in cold regions. Sciences in Cold and Arid Regions, 13(1): 1–17. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2021.00001
- 88.Li S. et al. Investigating the Constitutive Model of Frozen Supersulfate Saline Soil: Insights from Fractional Calculus //Cold Regions Science and Technology. – 2024. – C. 104202.

- 89.Li Dongqing, Huang X, Ming F, et al., 2015. Experimental research on acoustic wave velocity of frozen soils during the uniaxial loading process. Sciences in Cold and Arid Regions, 7(4): 0323–0328. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2015.00323.
- 90.Li Dongqing, Ming F, Huang X, Zhang Y. Application of Ultrasonic Technology for Measuring Physical and Mechanical Properties of Frozen Silty Clay. Cold Regions Engineering. 2015: 1-12. DOI: 10.1061/9780784479315.001
- 91.Li D., Huang X., Ming F., Zhang Y. The Impact of Unfrozen Water Content on Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soils, Procedia Engineering, Volume 143, 2016, Pages 1210-1217, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.114>.
- 92.Li K. Q. et al. State-of-the-Art Constitutive Modelling of Frozen Soils //Archives of Computational Methods in Engineering. – 2024. – C. 1-42.
- 93.Liao M., Lai Y., Wang C. A strength criterion for frozen sodium sulfate saline soil // Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1176-1185.
- 94.Liu B. et al. Study on electrical properties of saline frozen soil and influence mechanism of unfrozen water content //Cold Regions Science and Technology. – 2024. – T. 220. – C. 104146.
- 95.Liyun Tang, Ke Wang, Long Jin, Gengshe Yang, Hailiang Jia, Assaad Taoum, A resistivity model for testing unfrozen water content of frozen soil, Cold Regions Science and Technology, Volume 153, 2018, Pages 55-63, ISSN 0165-232X, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.05.003>.
- 96.Magnin F. et al. Determination of warm, sensitive permafrost areas in near-vertical rockwalls and evaluation of distributed models by electrical resistivity tomography // Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2015) pp. 745-762.
- 97.Nixon J. E., Lem G. Creep and strength testing of frozen saline fine –grained soils. Canadien Geotechnical Journal. 1984. 21. P. 518 - 529.

98. Nixon J. E. Pile load tests in saline permafrost at Clyde River Northwest Territories. // Canadian Geotechnical Journal. 1988. 25. P. 24 -32.
99. Park J. et al. Variation in Characteristics of Elastic Waves in Frozen Soils According to Degree of Saturation // Journal of The Korean Society of Civil Engineers (2013) pp. 1063-1075.
100. Pharr G. M., Merwin J. E. Effects of brine content on the strength of frozen Ottawa sands // Cold Regions Science and Technology. 1985. 11.P. 205 -212.
101. Pharr G. M., Godavarti P. S. A comparison of the creep behavior of saline ice and frozen saline Ottawa sand at 8deg.C. // Cold Regions Science and Technology. 1987. 14.P. 273 -279
102. Roman L.T., Kotov P.I. Viscosity of frozen and thawed soil. // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. V. 53. No 1. Pp. 19-23.
103. Sego D.C. Shultz T. Banash R. Strength and deformation behavior of frozen saline sand. // 3rd int. Symp. Ground Freezing. Hanover 1982. P. 11 – 19.
104. Sego D.C., Chernenko D. Confining pressure influence on strength of frozen saline sand. // Proceedings Cold Regions Engin. Conference. Canada, Montreal. 1984. P. 565 – 578.
105. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nat. Commun. 2017. Vol. 8.
106. Shan W., Liu Y., Hu Z.G., Xiao J.T. A model for the electrical resistivity of frozen soils and an experimental verification of the model // Cold Reg. Sci. Technol. 2015. Vol. 119. P. 75–83.

107. Wan, X.S., Lai, Y.M., 2013. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil. *Chin. J. Geotech. Eng.* 35 (11), 2090-2096.
108. Wan, X.S., Lai Y.M., and Chong, W. 2015. Experimental Study on the Freezing Temperatures of Saline Silty Soils// *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(2): 175-187.
109. Wang D.Y., Zhu Y.L., Ma W., Niu Y.H. Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soil // *Cold Regions Science and Technology*. 2006. Vol. 44. No 1. Pp. 12-19.
110. Wu Y., Nakagawa S., Kneafsey T.J. et al. Electrical and seismic response of saline permafrost soil during freeze-thaw transition // *Appl. Geophys.* 2017. Vol. 146. P. 16–26.
111. Xu, X.Z., Wang, J.C., Zhang, L.X., and Tao, Z.X. 1995. Mechanisms of frost heave and soil expansion of soils. Science Press: Beijing.
112. Yang, C.S., He, P., Cheng, G.D., et al., 2006. Uniaxial compressive strength of frozen saline silty clay. *Engineering Mechanics* 23 (1), 144–148.
113. Yang, C.S., He, P., Cheng, G.D. 2008. Study of stress-strain relationships and strength characteristics of saturated saline frozen silty clay. *Rock and Soil Mechanics* 29 (12), 3282–3286.
114. Zhang Z., Zhou H., Feng W., Zhang Z., Xiao D. A spherical template indenter for a frozen soil long-term shear strength test // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. No 131. Pp. 10-15.

## Список рисунков, приведенных в основном тексте работы

Рисунок 1.1. Схема распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов в Северном полушарии в зависимости от морского (черный) и континентального (серый) типов засоления (Брушков, 1998). ....	14
Рисунок 1.2. Схема – карта распространения засоленных многолетнемерзлых грунтов на территории России (Аксенов, 2008). ....	15
Рисунок 1.3. Ключ к номограммам определения льдистости ( $L_b$ ) по данным электроразведки (Рекомендации, 1989).....	31
Рисунок 1.4. Номограмма для определения модуля упругости Юнга по значениям скорости продольных волн, коэффициента Пуассона и плотности (Зыков, 1989).....	36
Рисунок 1.5. Номограмма для определения прочности на одноосное сжатие ( $\sigma_{сж}$ ) по значениям скорости продольных волн ( $V_p$ ) и температуры в мерзлых песчано-глинистых грунтах с массивной криотекстурой (Зыков, Червинская, 1989).....	39
Рисунок 2.1. Схема проведения экспериментов. ....	53
Рисунок 2.2. Образец суглинка с массивной криогенной текстурой.....	55
Рисунок 2.3. Измерительная установка УЭС: а) аккумулятор Hankook, б) генератор Astra, в) измерительное устройство APL-02, г) питающие электроды А и В, д) принимающие электроды М и N, е) образец мерзлого грунта.....	56
Рисунок 2.4. Зависимости удельного электрического сопротивления растворов солей от их концентрации и УЭС пород Ямала (1 — пески, 2 — суглинки), насыщенных растворами преимущественно хлоридного состава (Зыков, 2007). ....	57
Рисунок 2.5. Измерение акустических характеристик: а) Ультразвуковой дефектоскоп УД2Н-П, б) пьезодатчики, в) кольцо с грунтом.....	58
Рисунок 2.6. Запись волны (стрелкой отмечено время вступления Р-волны).59	
Рисунок 2.7. Одноштоковый сферический штамп конструкции НИС «Гидропроект»: 1 – опорная плита; 2 - направляющая стойка; 3 – консоль; 4 -	

верхний конец штока; 5 - нивелировочный винт; 6 – зубчатая рейка; 7 – направляющая муфта; 8 – площадка для размещения груза; 9 – шариковый штамп; 10 - стопорный винт; 11 – держатель индикатора; 12 – индикатор для измерения деформаций; 13- зажимной винт; 14 – груз.....	60
Рисунок 2.8. График зависимости изменения эквивалентного сцепления во времени.....	61
Рисунок 2.9. Скачок температуры при определении температуры замерзания. ....	63
Рисунок 2.10. Установка для определения начала замерзания грунта.....	64
Рисунок 3.1. Зависимость эквивалентного сцепления от времени испытаний в результате одного длительного и трех ускоренных испытаний шариковым штампом для суглинка $W=30\%$ , $D_{sal}=0,85\%$ при $T=-6^{\circ}C$ . .....	69
Рисунок 3.2. Графики зависимости эквивалентного сцепления от степени засоленности в песках при температуре: а) $-6^{\circ}C$ .б) $-4^{\circ}C$ в) $-2^{\circ}C$ . ....	71
Рисунок 3.3. Графики зависимости эквивалентного сцепления от степени засоленности в суглинках при температуре: а) $-6^{\circ}C$ .б) $-4^{\circ}C$ в) $-2^{\circ}C$ . ....	73
Рисунок 3.4. Зависимость удельного электрического сопротивления от степени засоленности для песков с $W=20\%$ при $T=-6^{\circ}C$ . ....	74
Рисунок 3.5. Зависимость скорости продольных волн от степени засоленности и влажности в суглинках при температуре $-6^{\circ}C$ . ....	76
Рисунок 3.6. Зависимость удельного электрического сопротивления (а) и скорости продольных волн (б) от засоленности в грунтах при различных влажности и температуре. ....	78
Рисунок 3.7. Зависимость удельного электрического сопротивления от концентрации порового раствора. ....	80
Рисунок 3.8. Зависимость скорости продольных волн от симплексного показателя в исследуемых грунтах. ....	82
Рисунок 3.9. Зависимость коэффициента вариации при различных видах испытаний от засоленности: удельное электрическое сопротивление	

(треугольник); скорость продольных волн (квадрат); эквивалентное сопротивление (ромб).....	84
Рисунок 3.10 Зависимость эквивалентного сцепления от удельного электрического сопротивления (а) и скорости продольных волн (б) для модельных грунтов: песок (треугольник); суглинок (квадрат).....	85
Рисунок 3.11. 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. .....	86
Рисунок 3.12. Зависимость эквивалентного сцепления модельных грунтов от удельного электрического сопротивления для модельных грунтов: 1 минута (ромб); 8 часов (квадрат); длительное (треугольник); предельно длительное (икс). .....	88
Рисунок 3.13 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для образцов песка.....	90
Рисунок 3.14 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для образцов суглинка.....	90
Рисунок 3.15 Сравнение экспериментально установленного и прогнозного значений эквивалентного сцепления для песков и суглинков. ....	91
Рисунок 3.16 Зависимость температуры начала замерзания от концентрации порового раствора при разных вариантах расчета для песка (а), суглинка (б) (Agapkin et al., 2021).....	95
Рисунок 3.17. Зависимость влажности незамерзшей воды при разной отрицательной температуре для супеси (а), глины (б) (Agapkin et al., 2021). 98	98
Рисунок 3.18 Сравнение графиков корреляции между значениями эквивалентного сцепления и скорости продольных волн из текущего исследованием (слева) и исследованием Червинской (1998) (справа).....	101

## **Список таблиц, приведенных в основном тексте работы**

Таблица 1.1. Оценка криогенной текстуры при совместном использовании ВЭЗ и электрокаротажа (Рекомендации, 1989).....	31
Таблица 1.2. Криогенная текстура в зависимости от коэффициента анизотропии (Рекомендации, 1989).....	32
Таблица 1.3. Использование георадиолокации и радиоизотопных методов для оценки физических свойств мерзлых грунтов. ....	46
Таблица 1.4. Использование методов электроразведки и сейсмоакустики для оценки физических и механических свойств мерзлых грунтов. ....	48
Таблица 2.1. Классификация грунтов по степени засоленности. ....	51
Таблица 2.2. Результаты определения коэффициента установки при разных концентрациях раствора. ....	58
Таблица 2.3. Характеристики свойств исследуемых грунтов. ....	66
Таблица 3.1. Изменение скорости продольных волн и удельного электрического сопротивления в зависимости от типа засоленности.....	83
Таблица 3.2. Формулы для расчета температуры начала замерзания. ....	93
Таблица 3.3. Формулы для расчета влажности незамерзшей воды. ....	96