

**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**ФГБОУ ВО РГУПС**

*На правах рукописи*



**Васильченко Андрей Александрович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ**  
**СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

2.9.2 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование  
железных дорог

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, доцент  
Шаповалов Владимир Леонидович

Ростов-на-Дону

2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА .....	16
1.1 Обзор зарубежных нормативных документов .....	16
1.2 Особенности технологии уплотнения грунта и контроля качества при строительстве земляного полотна железных дорог. Обзор отечественных нормативных документов .....	19
1.2.1 Влажность уплотняемого грунта .....	19
1.2.2 Достигаемые коэффициенты уплотнения .....	21
1.2.3 Контроль качества строительных работ .....	21
1.3 Современные требования к земляному полотну железных дорог. Обзор отечественных проектов и нормативных документов .....	23
1.4 Постановка задач исследования .....	26
1.4.1 Контроль качества грунтов для строительства земляного полотна ..	26
1.4.1.1 Уточнение влажности, классификационных и пластических свойств связных грунтов .....	26
1.4.1.2 Изменение состава грунтов из одного карьера .....	27
1.4.1.3 Модифицирование глинистых грунтов .....	27
1.4.2 Оптимальная влажность грунтов при уплотнении .....	28
1.4.3 Развитие методов измерений для решения поставленных задач .....	28
1.4.4 Прогноз деформации земляного полотна .....	29
1.5 Выводы .....	29
1.6 Методы измерения влажности для обеспечения соответствия новым техническим требованиям при проектировании .....	30
1.6.1 Методы определения влажности грунтов. Общие подходы .....	30
1.6.2 Определение влажности грунта методом высушивания до постоянной массы .....	31

1.6.3 Определение электрофизических характеристик и влажности грунта радиоволновыми методами .....	32
1.6.4 Модель увлажненного грунта .....	33
1.6.5 Диэлькометрические методы определения влажности .....	34
1.6.6 Кондуктометрические методы определения влажности .....	35
1.6.7 Метод ИК-спектроскопии для определения влажности .....	35
1.6.8 Метод георадиолокации .....	36
1.7 Выводы. Выбор методов для решения поставленных задач .....	37
<b>2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА .....</b>	<b>42</b>
2.1 Резонансный метод определения влажности грунтов .....	42
2.1.1 Автоматизация обработки данных .....	46
2.2 ИК-метод определения влажности грунтов .....	47
2.2.1 Экспериментальная часть технологии .....	47
2.2.2 Теоретическая часть технологии .....	48
2.2.3 Определение влажности глинистых грунтов .....	52
2.3 Георадиолокационный метод определения влажности грунтов .....	52
2.3.1 Тарировка георадиолокационной аппаратуры: теоретическая часть .	54
2.3.2 Тарировка георадиолокационной аппаратуры: экспериментальная часть .....	55
2.3.3 Георадиолокационный метод определения влажности несвязного грунта .....	57
2.4 Выводы .....	61
<b>3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА .....</b>	<b>63</b>
3.1 Изменение состава грунтов из одного карьера .....	63
3.1.1 Оценка точности алгоритма .....	67
3.1.2 Базисный набор .....	71
3.1.3 Исследованные перегоны .....	73

3.1.4 Анализ результатов исследований .....	78
3.2 Электрические свойства загипсованных минералов и грунтов .....	83
3.2.1 Материалы и подготовка образцов .....	84
3.2.2 Методы и результаты измерений .....	86
3.3 Апробация экспресс ИК-метода входного контроля грунтов при модификации его свойств добавлением алебаstra .....	94
3.4 Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев. Теория метода .....	98
3.5 Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев. Экспериментальные исследования .....	100
3.6 Сравнение дренирующих свойств слоев различных песков. Экспериментальные исследования .....	106
3.6.1 Использованные образцы и выполненные эксперименты .....	106
3.6.2 Сравнение полученных результатов .....	108
3.7 Измерение влажности песка методом резонансных измерений .....	112
3.8 Выводы по главе .....	114
4 КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ .....	117
4.1 Изменение свойств грунтов при длительной эксплуатации железных дорог .....	117
4.2 Методика и условия проведения эксперимента. Этап № 1 .....	118
4.2.1 Характеристики исследуемого грунта и подготовка образцов .....	118
4.2.2 Схема циклического нагружения-разгрузки и оборудование .....	118
4.2.3 Определение осадки насыпи при статической нагрузке. Верификация модели грунта .....	120
4.3 Этап № 2: Определение эпюры затухания нагрузок в насыпи и план циклических испытаний .....	124
4.3.1 Обработка результатов после 500 циклов испытаний. Аналитический расчет деформаций (метод послойного суммирования)	



и компьютерное моделирование .....	126
4.4 Этап № 3. Прогнозирование накопления осадок насыпи	
на длительный срок .....	128
4.4.1 Методика прогнозирования и аппроксимации экспериментальных	
данных .....	128
4.5 Общий вывод по главе .....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Программа обработки георадиолокационного разреза	
увлажненного конструкционного слоя из дренирующих грунтов .....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Программа для контроля уплотнения грунтов при	
строительстве земляного полотна по данным георадиолокационного	
обследования.....	160

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Социальное развитие общества и рост экономики страны формулирует новые требования к железнодорожному транспорту. В настоящее время актуальными задачами становятся *рост скоростей движения* новых перспективных транспортных систем [1], *увеличение интенсивности перевозок* [2], а также *развитие транспортной сети* (планируется строительство до 15,5 тыс. км железных дорог к 2030 году) [3].

В связи с этим решение задач гарантированного обеспечения эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры, относящихся к особо опасным, технически сложным и уникальным объектам [4], на весь период их жизненного цикла получает дополнительную актуальность.

Формирование эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры осуществляется на этапе строительства и определяется уровнем технических проектных решений, качеством используемых материалов, применяемыми технологиями и строгим контролем на всех этапах работ, а также иными факторами природного и техногенного характера. Гарантированное обеспечение эксплуатационной надежности объектов транспортной инфраструктуры позволяет дополнительно решать ряд важных задач железнодорожного транспорта, к которым в первую очередь можно отнести обеспечение безопасности движения поездов, снижение затрат на текущее содержание железнодорожного пути, минимизацию объемов технически сложных ремонтов в процессе работ по текущему содержанию пути.

Эксплуатационная надежность железнодорожного пути в период жизненного цикла может оцениваться развитием деформаций в процессе эксплуатации. Величины допустимых отклонений от норм содержания всей конструкции пути устанавливаются действующими нормативными документами в пределах, обеспечивающих как минимум безопасность движения поездов. В этом смысле деформационные процессы в отдельных конструктивных слоях объектов инфраструктуры допускаются в пределах, ограниченных их влиянием на

геометрию рельсовой колеи. Среди отечественных исследователей проблемами надежности и деформативности железнодорожного пути занимались А. Ю. Абдурашитов, Г. Л. Аккерман, Е. С. Ашпиз, В. П. Бельтюков, Л. С. Блажко, В. В. Виноградов, В. И. Грицык, Э. М. Добров, П. И. Дыдышко, О. П. Ершков, А. В. Замуховский, А. Л. Исаков, В. Д. Казарновский, В. Б. Каменский, А. Я. Коган, А. Ф. Колос, Г. Г. Коншин, М. Я. Крицкий, А. Г. Круглый, А. Л. Ланис, С. Я. Луцкий, В. И. Новакович, В. О. Певзнер, И. В. Прокудин, Ю. С. Ромен, А. В. Савин, Г. М. Стоянович, Т. В. Суворова, О. А. Суслов, В. П. Сычев, Ю. К. Фроловский, Г. М. Шахунянц, В. А. Явна. Ими созданы методы оценки показателей надежности железнодорожного пути и уровня риска появления отказов элементов железнодорожного пути.

Очевидно, что количество технически сложных ремонтов в процессе жизненного цикла железнодорожного пути зависит от соблюдения проектных решений и технологии строительства, а также качества строительно-монтажных работ. Известны результаты исследований отечественных ученых в области организации строительства и контроля качества земляного полотна. Эти исследования выполняли В. С. Воробьев, В. В. Виноградов, Г. Н. Жинкин, А. Ф. Колос, С. Я. Луцкий, Г. С. Переселенков, П. Г. Пешков, А. А. Пиотрович, Г. М. Стоянович, Э. С. Спиридонов, А. А. Цернант, Г. М. Шахунянц, Т. В. Шепитько, Т. Г. Яковлева. Они исследовали влияние физико-механических характеристик грунта на распределение вертикальных напряжений в теле земляного полотна под действием разных видов подвижного состава, развивали технологии организации и планирования строительства, создали технологии контроля качества строительства.

Интерес к теме эксплуатационной надежности многослойных грунтовых конструкций в период жизненного цикла при меняющихся условиях эксплуатации пути поддерживается на высоком уровне. Анализ базы данных ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), показал, что в среднем за последние десять лет публикуется порядка 53 научных работ в год. Количество публикаций, посвященных этой проблеме, растет, что видно на графике рисунка 1.

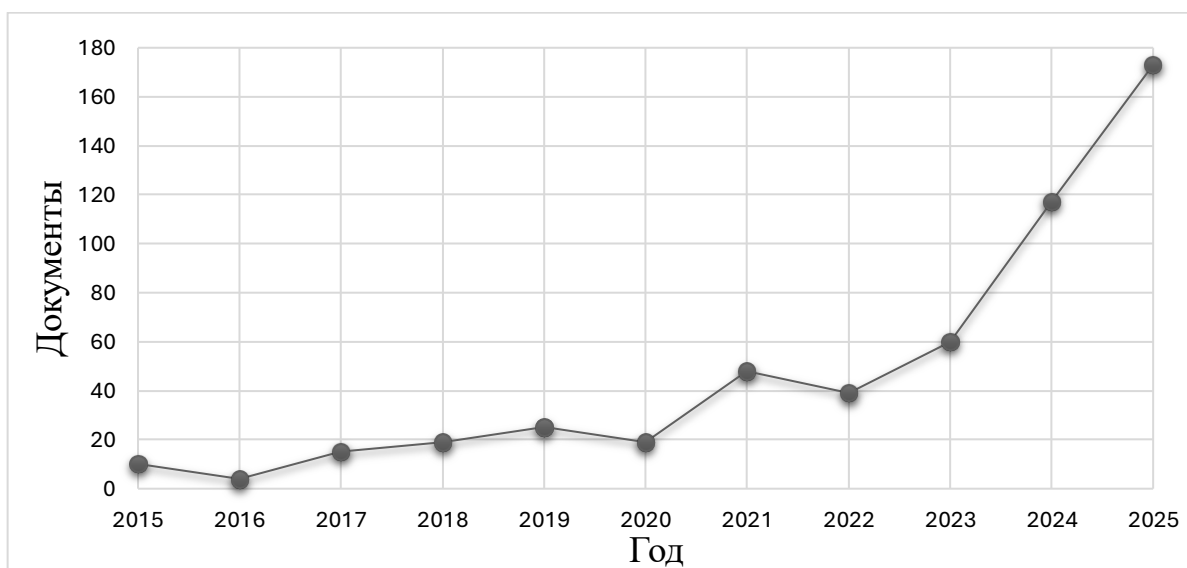


Рисунок 1 – Количество публикаций, посвященных теме исследования

(Источник: база данных ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com>)

**Степень разработанности темы исследования.** Наблюдаемая в последние годы интенсификация перевозочного процесса по некоторым направлениям, связанная с ростом скоростей движения подвижного состава и увеличением его массы, приводит к росту нагрузок на железнодорожный путь, что делает актуальной тему настоящего исследования.

Рост нагрузок может вызывать деформации земляного полотна и потерю устойчивости пути в целом. Для обеспечения безопасности движения поездов в таких условиях нормативными документами, регламентирующими строительство земляного полотна железных дорог, заложены жесткие требования к *максимальным накопленным остаточным деформациям*. Соответствующие требования формулируются на длительные сроки, зачастую совпадающие со сроком эксплуатации железнодорожного пути.

Примерами таких нормативных документов являются китайские национальные стандарты, согласно которым допустимая дифференциальная осадка земляного полотна на переходных участках пути должна быть *меньше 5 мм*, а последующий угол изгиба рельса должен быть ограничен отношением  $1/1000$ , а также немецкий стандарт и стандарт Франции. Опубликованы литературные

обзоры по деградации элементов конструкции действующих железных дорог: рельсов, шпал, упругих элементов конструкции. В настоящее время направления исследований, связанные с изучением поведения земляного полотна железных дорог, деградации грунтов под многолетним периодическим воздействием подвижного состава, имеют большое значение, а полученные результаты широко обсуждаются в научной периодике. Одним из эффективных методов прогнозирования величин возможных деформаций за значительные временные интервалы, сравнимые со временем эксплуатации железных дорог, является компьютерное моделирование. При таком подходе компьютерные модели элементов конструкции земляного полотна должны строиться с учетом временных зависимостей параметров грунтов и материалов, учитываемых при расчетах. К ним относятся зависимости физико-механических параметров грунтов от характеристик прилагаемых нагрузок и их цикличности.

Анализ степени разработанности темы позволил конкретизировать цель и задачи данного исследования.

**Цели и задачи исследования.** *Целью* исследования является совершенствование методов определения свойств грунтов для обеспечения качества проектирования, строительства и ремонта земляного полотна железных дорог.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

1. Разработаны теоретические подходы и алгоритмы оперативного получения характеристик грунтов железнодорожного земляного полотна методами: резонансным, инфракрасной спектроскопии и георадиолокации.
2. Разработаны методики оперативной оценки влажности грунта и его минерального состава.
3. Разработаны методики оперативной оценки концентрации модификаторов механических свойств грунтов земляного полотна.
4. Разработаны способы определения дренирующих свойств песчаных грунтов земляного полотна.

5. Разработан комплексный подход к прогнозированию накопления остаточных деформаций железнодорожного земляного полотна.

Решение поставленных в диссертационной работе задач с учетом стратегии и концепции развития компании ОАО «РЖД» направлено на повышение эффективности ведения путевого хозяйства посредством:

- оптимизации этапов планирования и процессов реализации работ по техническому обслуживанию и ремонту пути;
- совершенствования технологических нормативов в области ремонта железнодорожного пути;
- повышения эффективности инфраструктурного комплекса за счет совершенствования систем мониторинга и диагностики объектов инфраструктуры.

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

1. Установлены функциональные зависимости диэлектрической проницаемости и влажности грунта от резонансной частоты в диапазоне частот применяемого в работе георадиолокационного оборудования.

2. Комплексирование резонансного и радиоволнового методов с использованием полученной аппроксимационной зависимости позволяет определять значения диэлектрической проницаемости с погрешностью, не превышающей 10 %.

3. Впервые предложен и обоснован метод тарировки георадиолокационной аппаратуры при определении влажности грунтового слоя.

4. Предложен алгоритм математической обработки инфракрасных спектров, позволяющий определять влажность и минеральный состав песчаных и глинистых грунтов, а также оценивать концентрацию модификаторов в грунте, основанный на решении системы линейных неоднородных уравнений.

5. Изучен механизм поляризации Максвелла – Вагнера, объясняющий нехарактерное затухание георадиолокационного излучения в глинистых грунтах с низкой влажностью.

6. Получены функциональные зависимости изменений электрофизических параметров пористых грунтовых слоев от времени дренирования воды,

позволившие разработать методику оценки распределения влажности в объеме песчаного грунта.

7. Впервые предложена методика прогнозирования величины деформаций земляного полотна на заданный период эксплуатации по результатам обработки данных, полученных в ходе циклических компрессионных испытаний грунтового материала.

**Теоретическая значимость работы.** Результаты теоретических исследований, проведенных в данной работе, позволили создать алгоритмы и методики обработки экспериментальных данных при развитии инфракрасной спектроскопии, резонансного и георадиолокационного методов, лабораторных и натурных измерений влажности и механических свойств грунтов, необходимых при оценке прочности и устойчивости земляного полотна, а также разработать способ прогнозирования изменения деформационных свойств грунтов, учитывающий особенности циклического нагружения пути поездной нагрузкой и возможные отклонения плотности грунта от проектных значений при строительстве и ремонтах железнодорожного земляного полотна.

**Практическая значимость работы.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в данной работе, легли в основу создания алгоритмов обработки данных измерений для экспресс-контроля свойств грунтовых материалов, используемых для возведения и ремонта земляного полотна железных дорог.

Результаты настоящего диссертационного исследования могут найти применение при разработке требований к специализированному приборному обеспечению оперативного контроля земляных работ и технологии его применения для повышения темпов строительства без потери качества.

Разработанный способ прогноза накопления остаточных деформаций железнодорожного земляного полотна может лечь в основу методики прогнозирования стабильности земляного полотна на длительный период эксплуатации.

Результаты натурных применений разработанных методик теоретических и лабораторных исследований могут быть использованы для разработки нормативной документации, регламентирующей проведение контроля качества сооружения железнодорожного земляного полотна.

**Объект исследования.** Объектом исследования является земляное полотно железных дорог.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются свойства грунтовых материалов, используемых при строительстве земляного полотна железных дорог.

**Методы исследования.** При решении задач, поставленных в работе, проводились экспериментальные исследования в лабораторных условиях и на натурных объектах. Лабораторные исследования выполнялись с использованием поверенного оборудования аккредитованной лаборатории НИИЛ «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве» РГУПС (аттестат № RA.RU.21PC69 от 29.01.2016). Натурные исследования были выполнены на действующих и строящихся участках железных дорог. Теоретические исследования выполнялись методами классической электродинамики, компьютерного моделирования, программирования и алгоритмизации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методики оперативного контроля свойств грунтов при строительстве и ремонтах железнодорожного земляного полотна, базирующиеся на результатах обработки данных инфракрасной спектроскопии, применения резонансного и георадиолокационного методов:

- методика определения влажности грунта;
- методика определения минерального состава грунта;
- методика определения электрических свойств грунта.

2. Методика оценки концентрации модификаторов, добавленных в полиминеральные грунты, и механических свойств укрепленных грунтов по интенсивности полос инфракрасных спектров.



3. Способ контроля миграции воды в дренирующих грунтах методом георадиолокации.

4. Способ прогноза накопления остаточных деформаций земляного полотна, основанный на моделировании циклического поездного воздействия на грунт в условиях компрессионного сжатия.

**Степень достоверности результатов исследования.** Достоверность полученных теоретических результатов и выводов определяется верификацией экспериментальными измерениями, проведенными в лабораторных условиях и на натурных объектах, поверенным оборудованием испытательной лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве» РГУПС.

Достоверность разработанных методов и алгоритмов верифицирована лабораторными и натурными измерениями, которые выполнялись по утвержденным методикам и нормативным документам.

Достоверность корреляционных методов, связывающих электрические и физические свойства материалов конструктивных слоев железнодорожного пути и объектов инфраструктуры, верифицировалась результатами лабораторных исследований.

Достоверность теоретических результатов, полученных методами конечных элементов для компьютерных моделей насыпи земляного полотна, подтверждена применением апробированной лицензированной компьютерной программы Plaxis 2D версии 2019.00 3-4066549 и сходимостью результатов расчета с результатами экспериментальных измерений.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: Международной научно-практической конференции «ТРАНСПРОМЭК-2019» (Ростов-на-Дону, 2019, 2024 гг.); 15-я конференции и выставке «Инженерная и горная геофизика – 2019», (Геленджик, 2019 г.), 16-й научно-практической конференции совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020» (Пермь, 2020 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, 2020, 2021,

2022, 2024 гг.); 17-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная и рудная геофизика 2021» (Геленджик, 2021 г.); International Scientific Siberian Transport Forum “TransSiberia – 2021” (Новосибирск, 2021 г.); XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability (Иркутск – Красноярск, 2022 г.).

### **Соответствие основных результатов работы паспорту специальности**

Положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 2.9.2 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог, в части пунктов:

– п. 3. Конструкции верхнего и нижнего строения железнодорожного пути. Основные параметры, направления развития, проектирование, изготовление. Система технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути. Технология производства и организация работ;

– п. 8. Эксплуатационная надежность железнодорожного пути;

– п. 12. Методы и средства изысканий и проектирования железных дорог. Оценивание проектных решений по комплексному и частным критериям эффективности.

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту, обсуждены и опубликованы в 25 печатных работах, из которых 3 работы – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 13 работ – в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, и 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ [30–31].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 160 страниц машинописного текста, в том числе 158 страниц основного текста, 57 рисунков, 20 таблиц, 2 приложения. Список литературы включает 165 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

# **1 ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

## **1.1 Обзор зарубежных нормативных документов**

Наблюдаемое в последние годы развитие сети железных дорог, воплощение амбициозных проектов по соединению стран и континентов железнодорожными магистралями базируется на достижениях науки, технологий и практики строительства, которые находят отражение в национальных нормативных документах.

Китайский национальный стандарт [32] распространяется на высокоскоростные железные дороги проектной скоростью ~250–350 км/ч. Также проектируемые железные дороги для высокоскоростных железнодорожных перевозок грузов должны учитывать реализацию соответствующих норм. В этом документе предусмотрена эксплуатация пути в течение более 100 лет и предъявляются жесткие требования к характеристикам системы «путь – земляное полотно» на все это время. Например, согласно [32], допустимая дифференциальная осадка земляного полотна на переходных участках пути не должна превышать 5 мм, а последующий угол изгиба рельса должен быть ограничен отношением 1/1000.

Согласно информации, приведенной в [33], Китайская железнодорожная корпорация имеет хорошо развитую систему для тестирования, ввода в эксплуатацию и обеспечения безопасности железнодорожных линий. Отличительной особенностью процедуры ввода в эксплуатацию является то, что официальная приемка обычно происходит после года опытной эксплуатации. За это время проводится полная проверка и оценка общего состояния конструкции. Контроль и оценка рисков безопасности движения осуществляется на протяжении всего жизненного цикла и включает оценку технических решений на этапе проектирования, качества строительства, а также результаты диагностики и обслуживания в процессе эксплуатации.

В настоящее время Китай обладает развитой транспортной сетью, включающей до 47 тыс. км высокоскоростных железных дорог.

Важной особенностью всех национальных стандартов является нормирование величины возможных деформаций. Например, стандарт Германии [34] для безбалластных насыпей допускает осадки, не приводящие к прогибу пути, величиной  $1/500$  эталонной длины. Обычно допускаются осадки 15 мм для расчетной скорости 300 км/ч. В случае пути с ездой на балласте они могут составлять до 30 мм за все время эксплуатации земляного полотна, которое планируется на срок, превышающий 100 лет. Стандарт Франции [35] допускает оседание балласта максимум до 10 мм в год в течение первых 25 лет эксплуатации при общем сроке эксплуатации, также превышающем 100 лет.

Особое внимание в нормативных документах уделяется качеству используемых при строительстве земляного полотна грунтовых материалов. В [35] указывается, что следует избегать набухания грунта на высокоскоростных линиях. Набухание допустимо только в особых случаях, и необходимо, чтобы его величина была ограничена 10 мм в год.

Порядок выбора грунтов для строительства земляного полотна рассматривается во всех вышеперечисленных нормативных документах. В документе [36] отмечается, что подходы к решению этой задачи должны соответствовать ASTM D2487-06 «Классификация грунтов для инженерных целей (Единая система классификации грунтов)» и ASTM D2488-06 «Описание и идентификация грунтов». Кроме этого, проект, включающий в т. ч. план и продольный профиль, должен быть разработан таким образом, чтобы свести к минимуму потребность в материалах из временных или существующих карьеров и месторождений за пределами полосы отчуждения. При проектировании перемещения грунта необходимо минимизировать транспортные издержки, а грунт недостаточного качества может быть использован для озеленения и земляных инженерных сооружений в местах, где они не будут влиять на работу высокоскоростной линии в случае оползания откоса или неблагоприятных погодных условий.

Попытка сравнить нормативные документы некоторых европейских стран, регламентирующие требования по содержанию железнодорожного полотна, сталкивается с рядом трудностей. В работе [37] эта трудность связывается с отсутствием общих теоретических подходов при формулировании требований и правил. В их основе, как правило, лежит эмпирический подход, сформировавшийся за длительный срок эксплуатации железнодорожного транспорта в различных условиях стран европейского континента. Например, при выборе толщины балластного слоя приходится выбирать оптимальное решение между стоимостью строительства и величинами динамических нагрузок на земляное полотно, которые могут привести к чрезмерным деформациям, как и в случаях, когда использован непрочный грунтовый материал для его строительства.

Особую актуальность необходимости научного исследования свойств грунтов придает проблема просадок при длительной эксплуатации земляного полотна в условиях повышенных механических нагрузок и негативного воздействия природных факторов. Эта проблема вызывает растущую обеспокоенность в связи с ростом протяженности особогрузонапряженных и высокоскоростных дорог в регионах с распространением слабых грунтов [38]. В указанном исследовании отмечается актуальность разработки метода прогнозирования осадок, для чего необходимо продолжать изучение долговременных динамических свойств и эксплуатационных характеристик оснований насыпей разных конструкций.

В работе [39] отмечается, что установленный срок службы земляного полотна (более 100 лет) в условиях экстремальных климатических воздействий, длительной динамической нагрузки на дорожное полотно влечет множество инженерных проблем, в том числе чрезмерную осадку, трещины в бетоне верхнего строения пути, пустоты под плитами и др. В этой работе отмечается, что динамические нагрузки, вибрация пути и земляного полотна в значительной степени связаны со скоростью движения поезда. Для каждой конструкции пути существует критическая скорость, близкая к скорости волны Рэлея. Когда скорость поезда ниже этого значения, уровень вибрации определяется почти линейным

законом. Превышение критического значения скорости движения поезда приводит к ускорению нарастания вибраций. В связи с этим при строительстве необходимо использовать грунты с механическими свойствами, увеличивающими значение критической скорости, что уменьшит просадки пути при длительной эксплуатации.

*Резюмируя рассмотренные публикации, можно отметить следующее:*

*– нормативные документы базируются во многом на эмпирических знаниях, сформированных с учетом региональных особенностей организации железнодорожного движения, применяемых конструкций железнодорожного пути, природного и техногенного воздействия на путь, свойств строительных материалов;*

*– величины нормируемых осадок земляного полотна влияют на допустимые просадки верхнего строения пути, определенные из требований обеспечения безопасности движения поездов;*

*– исследования, направленные на развитие теории и методов определения просадок при длительной (более 100 лет) эксплуатации пути, способные уточнить критерии выбора грунта для строительства особогрузонапряженных и высокоскоростных железных дорог, являются весьма актуальными.*

## **1.2 Особенности технологии уплотнения грунта и контроля качества при строительстве земляного полотна железных дорог. Обзор отечественных нормативных документов**

### ***1.2.1 Влажность уплотняемого грунта***

В источнике [40] отмечено следующее (краткие выдержки):

«...2.1.6. Влажность песчаных и глинистых грунтов, укладываемых в насыпь и подлежащих уплотнению, должна быть оптимальной ( $W_o$ ) или близкой к ней. Если естественная влажность применяемых глинистых грунтов окажется ниже  $0,9W_o$  и песков менее 4 % необходимо производить увлажнение их до получения оптимальной влажности.

2.1.7. Максимальная допустимая влажность грунтов ( $W_{пр.}$ ), применяемых для устройства насыпи, при которой будет обеспечена требуемая плотность, может быть определена по формуле:

$$W_{пр.} = K_y \cdot W_o, \quad (1.1)$$

где  $K_y$  – коэффициент «переувлажнения», принимаемый по табл. 2.3»;

$W_o$  – оптимальная влажность в % для данного грунта [40].

«...5.2.4. Уплотнение грунтов производится при влажности, близкой к оптимальной ( $W_o$ ). При отклонениях естественной влажности грунта от допустимых значений ее следует увлажнять или подсушивать. Уплотнение тяжелых суглинков и глин следует производить при их влажности не более  $1,05W_o$ ».

В источнике [41] значения влажности для песков заметно меньше. В пп. 4.21 [41] отмечено, что при влажности глинистых грунтов, мелких и пылеватых песков менее  $0,75-0,80 W_o$  их необходимо увлажнять.

В источнике [42] отмечено следующее (краткие выдержки):

«Для возведения насыпей следует применять преимущественно грунты, имеющие оптимальную влажность  $W_o$  или близкую к ней. Песчаные, пылеватые и глинистые грунты с влажностью менее  $0,75-0,90 W_o$  перед уплотнением необходимо увлажнять до получения оптимальной влажности или близкой к ней. Предельную влажность  $W_{пр.}$  при которой будет обеспечен требуемый коэффициент уплотнения грунта в насыпях, допускается устанавливать по формуле:

$$W_{пр.} = K_{п.} \cdot W_o, \quad (1.2)$$

где  $K_{п.}$  – коэффициент, принимаемый по табл. 9.6» [42, с. 169, п. 9.1.8].

При назначении предельных значений влажности грунта следует учитывать, что влажность грунтов в насыпях не должна превышать, как правило, величины  $W_p + 0,25W_{п.}$  ( $W_p$  – предел раскатывания, %;  $W_{п.}$  – число пластичности).

Требования по влажности, сформулированные в [43], имеют следующий вид:

«... – п. 4.21. Уплотнение грунтов следует производить при влажности, близкой к оптимальной.

– п. 4.22. При влажности менее оптимальной следует увеличивать число проходов катка, а при влажности менее допустимых значений, указанных в табл. 1, увлажнять грунт. При уплотнении песчаных грунтов виброкатками следует проверять возможность достижения требуемой плотности при их естественной влажности.

– п. 4.23. При использовании грунтов, имеющих влажность более допустимых значений, следует предусматривать просушивание грунта: естественным способом, введением песка, сухого малосвязного грунта, шлаков, неактивных зол, укладываемых в виде дренирующих слоев или водопоглощающих прослоек, а также активных добавок (известь, зола-унос, гипс и др.), применяемых для осушения глинистых грунтов в основании и верхней части земляного полотна».

### ***1.2.2 Достигаемые коэффициенты уплотнения***

В [44] в п. 6.5.1.3 указано, что контроль качества строительства земляного полотна – грунтового инженерного сооружения – следует осуществлять сопоставлением полученных значений плотности сухого грунта со значениями, предусмотренными проектом.

В п. 4.11–4.17 [41] и в п. 6.3 [45] указаны лишь минимальные значения коэффициентов уплотнения при расчете требуемой плотности песчаных и глинистых грунтов.

### ***1.2.3 Контроль качества строительных работ***

В нормативной документации на строительство земляного полотна требования к местам контроля уплотнения грунтового материала в профиле строящегося железнодорожного пути и их количеству представлены в ряде пунктов нижеприведенной нормативной документации.

В [40] указано, что плотность грунта насыпи необходимо определять в процессе возведения земляного полотна, а количество образцов для определения



плотности грунта назначают в зависимости от ширины уплотняемого слоя и высоты насыпи (п. 9.2.6). В п. 9.2.10 приведены методы для определения качества уплотнения. Технология выбора точек для отбора грунта приведена в п. 10.9. Возможные отклонения в результатах определения уплотнения от требования проекта определяют оценку качества выполненных работ (п. 10.12).

В [42] указано, что коэффициент уплотнения грунта определяется в каждом уплотняемом слое на глубине 10–15 см от поверхности по его оси и в 1,0–2,0 м от бровки земляного полотна, а по длине захватки работы грунтоуплотняющих машин не реже чем через 100 м [Там же, с. 184]. Перечень основных контролируемых параметров по видам работ с указанием необходимого количества их измерений и величин допускаемого отклонения приведен в табл. 12.1 [Там же, с. 202]. В приложении 10 [Там же, с. 242] отмечено, что общее количество замеров плотности определяется из расчета не менее одного замера на 300 м<sup>3</sup> уплотненного грунта. Оценке качества выполненных работ посвящен п. 9.2.36, где указано, что качество уплотнения грунта необходимо оценивать по величине достигнутого коэффициента уплотнения. Также изложен порядок проведения приемочного контроля, выполняемого по завершении строительства [Там же, с. 203].

В п. 4.77 [43] указано, что плотность грунта следует контролировать в каждом технологическом слое по оси земляного полотна и на расстоянии 1,5–2,0 м от бровки, а при ширине слоя более 20 м – также в промежутках между ними.

Контроль плотности грунта необходимо производить на каждой сменной захватке работы уплотняющих машин, но не реже чем через 200 м при высоте насыпи до 3 м и не реже чем через 50 м при высоте насыпи более 3 м. Контроль плотности верхнего слоя следует производить не реже чем через 50 м.

Дополнительный контроль плотности необходимо производить в каждом слое засыпки пазух труб, над трубами, в конусах и в местах сопряжения с мостами. Контроль плотности следует производить на глубине, равной 1/3 толщины уплотняемого слоя, но не менее 8 см. Отклонения от требуемого значения коэффициента уплотнения в сторону уменьшения допускаются не более чем в 10 % определений от их общего числа и не более чем на 0,04.

В п. 20.2 [45] указано, что контроль плотности грунта необходимо проводить на каждой сменной захватке работы уплотняющих машин.

В п. 7.27 [46] указано, что пробы отбираются одна на каждые 300 м<sup>3</sup> укладываемого в насыпь грунта.

*Резюмируя рассмотренные требования, можно отметить следующее.*

*– значения влажности конструкционных слоев, когда нужно проводить дополнительное увлажнение, установлены эмпирически. Вне рамок регламентирующих документов остались вопросы о технологии увлажнения и распределения и о достигаемом распределении влажности внутри конструкционного слоя во время начала уплотнения. Вместе с этим указанные вопросы являются определяющими при оценке эффективности дополнительного увлажнения (а возможно, ожидания при просушивании) при достижении проектных показателей уплотнения;*

*– отступление от оптимального (или близкого к нему) значения влажности при достижении проектных значений уплотнения допустимо компенсировать корректировкой приложенной нагрузки, что с неизбежностью приводит к дополнительному удорожанию строительства;*

*– требуемая плотность грунта, а следовательно, и нормируемые коэффициенты уплотнения устанавливаются, как правило, в проектах. При этом только в одном документе ([43]) уделяется внимание допустимым отклонениям достигнутых коэффициентов уплотнения от проектных значений.*

### **1.3 Современные требования к земляному полотну железных дорог. Обзор отечественных проектов и нормативных документов**

Требования к прочности и устойчивости земляного полотна планируемых к строительству высокоскоростных железных дорог в РФ формируются по такому же принципу, как и действующие за рубежом. Например, в [47–48] нормируются максимальные накопленные остаточные деформации основной площадки земляного полотна за весь срок ее полезного использования. При безбалластной

конструкции верхнего строения пути она должна не превышать 15 мм, а максимальная накопленная остаточная деформация основной площадки земляного полотна при верхнем строении пути с ездой на балласте не должна превышать 100 мм за 25 лет эксплуатации при интенсивности не более 10 мм в год. Кроме этого, остаточная деформация основной площадки должна быть равномерной в продольном направлении, а уклон, вызванный осадкой, не должен превышать 0,25 ‰.

При этом указывается, что толщина отсыпаемых слоев, число проходов уплотняющих машин по одному следу, продолжительность воздействия рабочих органов на грунт и другие технологические параметры, обеспечивающие проектную плотность грунта, должны определяться опытным путем.

В [47–48] указано, что для оценки качества уплотнения грунтов верхнего защитного слоя должно производиться определение модулей деформации на основе штамповых испытаний. При этом требуемые коэффициенты уплотнения грунтов верхних, включая защитные, слоев должны составлять величину не менее 1,0, а требуемый коэффициент уплотнения грунтов насыпи ниже уровня второго защитного слоя должен составлять не менее 0,98.

В нормативном документе [48], помимо иных, рассмотрены вопросы выбора грунтов для строительства земляного полотна. При этом указано, что следует в первую очередь использовать грунты близлежащих выемок и притрассовых карьеров (п. 6.1.2).

В документе [48] предписано проводить входной и операционный контроль строительства земляного полотна. Контроль начинается с проверки соответствия проектных и фактических показателей состава и состояния грунтов в карьерах, выемках, естественных основаниях. Оценка качества уплотнения на этапе операционного контроля осуществляется по каждому технологическому слою. Объем работ по оценке качества уплотнения грунтов при операционном контроле остается локальным. Количество испытаний нормировано и приведено в [47–48]. Дополнительно для оперативной оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна может быть использован модуль динамической деформации.

Операционный контроль производится в соответствии со схемами операционного контроля, составляемыми непосредственно при разработке проекта производства работ на каждый технологический процесс. Для подтверждения представленных показателей качества грунтов и степени их уплотнения должны назначаться контрольные проверки. Объем контрольных испытаний должен составлять не менее 1/3 объема испытаний при операционном контроле.

Регламент работ при возведении земляного полотна высокоскоростных железных дорог представлен в [49]. В этом документе рассмотрены вопросы выбора грунтов для строительства (п. 5.5) с указанием допустимых минимальных значений некоторых параметров. Для земляного полотна безбалластного пути допускается использовать глинистые грунты при условии улучшения их физико-механических свойств за счет дополнительных мероприятий. При этом регламентированы численные значения параметров уплотнения защитных слоев (п. 5.6).

При выполнении работ по уплотнению грунт должен иметь влажность близкую к оптимальной по ГОСТ 22733-2016. Отклонение не должно превышать 10 % (п. 7.1.3.5).

В [49] регламентирована процедура выполнения контроля всех типов и уровней. Перечень основных контролируемых параметров при сооружении земляного полотна высокоскоростной магистрали (ВСМ) выбирается согласно требованиям СТУ-3 (п. 8.1.5) [48]. Для контроля качества земляных работ в соответствии с рабочей документацией могут применяться методы неразрушающего контроля с использованием инженерно-геофизических исследований (георадар, сейморазведочная и сейсмоакустическая аппаратура, электроразведочная аппаратура и аппаратура для электротомографии и др.).

Инженерным и компьютерным методам расчета осадки земляного полотна железнодорожного пути посвящена работа [50], в которой рассмотрены общие подходы к расчетам деформации земляного полотна и компьютерное моделирование свойств насыпей. В этой работе рассмотрены и проанализированы основные подходы к моделированию свойств земляного полотна и выработаны

методические рекомендации к проведению расчетов на этапе проектирования строительства современных железных дорог.

*Резюмируя рассмотренные в проектах и утвержденных нормативных документах требования, можно отметить, что они обобщают национальный опыт, накопленный при строительстве земляного полотна, и в достаточной мере используют наработки, отраженные в нормативных документах других стран.*

## **1.4 Постановка задач исследования**

В данном разделе рассмотрены научные и технологические задачи данного исследования и предпосылки их возникновения, следующие из анализа информации, приведенной в цитируемых источниках.

### ***1.4.1 Контроль качества грунтов для строительства земляного полотна***

#### **1.4.1.1 Уточнение влажности, классификационных и пластических свойств связных грунтов**

В [49] при езде на балласте допускается использование глинистых грунтов твердой и полутвердой консистенции ( $I_L \leq 0,25$ ), кроме глинистых грунтов с влажностью на границе текучести  $W_L$  более 0,40. Технологии определения этих характеристик регламентированы нормативными документами ГОСТ 5180-2015 [51], ISO / TS 17892-12 (2004) [52] или ASTM D-4318 (2010) [53].

Согласно [49] (п. 8.1.6) до начала производства работ должно быть проверено соответствие проектных и фактических показателей состава и состояния грунтов в карьерах, выемках, естественных основаниях; в процессе разработки выемок и карьеров должны проводиться систематические наблюдения за изменением влажности грунтов.

#### **1.4.1.2 Изменение состава грунтов из одного карьера**

В целях экономии денежных средств допускается использовать местный грунт вдоль строящейся линии. В связи с этим необходимо контролировать соответствие свойств грунтов проектным требованиям. Данная проблема может решаться оперативно определением минерального состава грунтов на входном контроле с помощью инфракрасной аттенуированной спектроскопии полного отражения.

#### 1.4.1.3 Модифицирование глинистых грунтов

В [49] указано, что допускается использовать непригодные для строительства глинистые грунты при условии улучшения их физико-механических свойств за счет дополнительных мероприятий. При проектировании насыпей на недостаточно прочном основании должна рассматриваться необходимость улучшения физико-механических свойств грунтов основания, методы выполнения которого хорошо известны и продолжают разрабатываться. В основе управления свойствами грунтов основания лежит применение различных добавок, которые должны удовлетворять экологическим нормам. Это может достигаться в том числе методом смешивания грунтов из различных источников строительных материалов или введением в грунты различных реагентов органического или неорганического происхождения. В основу такой технологии могут быть положены требования по изменению пластичности грунтов, их набухания/просадочности или улучшения прочностных и деформационных свойств.

#### ***1.4.2 Оптимальная влажность грунтов при уплотнении***

Влажность песчаных и глинистых грунтов, укладываемых в насыпь и подлежащих уплотнению, должна быть оптимальной ( $W_o$ ) или близкой к ней. Если естественная влажность применяемых грунтов оказывается ниже, необходимо производить увлажнение их до получения оптимального значения [40–43, 47–49].

Качество уплотнения песчаных и глинистых грунтов существенным образом зависит от их увлажнения. Опыт определения оптимальной влажности песков,

использованных на строительстве железнодорожного пути на полигонах Северо-Кавказской и Приволжской железных дорог, свидетельствует о варьировании этой величины в широких пределах. Встречаются случаи, когда характеристики проб песка из одного карьера имеют существенные отличия. Эти обстоятельства требуют точного определения влажности песков при проведении работ по их уплотнению. Необходимо отметить, что стандартизованные методы измерения влажности выполняются длительное время (до 4–5 ч). За время их проведения в жаркое время или из-за выпадающих осадков влажность материала может изменяться. Решением проблемы может служить использование экспресс-методов измерения влажности с применением георадиолокационного оборудования. Требуемая точность измерений может достигаться тарированием аппаратуры на данный тип материала.

#### ***1.4.3 Развитие методов измерений для решения поставленных задач***

Решение поставленных задач тесно связано с применением объективных методов измерений свойств грунтов и конструктивных грунтовых слоев. В связи с этим важной задачей является анализ применяемых стандартных методов и выбор из их числа необходимых для решения поставленных задач.

#### ***1.4.4 Прогноз деформации земляного полотна***

Как отмечалось выше, в цитируемой литературе сформулирована мысль о том, что необходимо продолжить исследования, направленные на развитие теории и методов определения осадок земляного полотна при длительной (более 100 лет) эксплуатации пути, способных уточнить критерии выбора грунта для строительства особо грузонапряженных и высокоскоростных железных дорог.

В связи с задачами исследования в данной работе также относится ***разработка комплексного подхода к прогнозированию накопления остаточных деформаций железнодорожного земляного полотна.***

## **1.5 Выводы**

Выполненные научные исследования направлены на повышение эксплуатационной надежности в период жизненного цикла железнодорожного пути, что позволяет дополнительно повысить безопасность движения поездов, снизить число ремонтов земляного полотна и затраты на текущее содержание пути.

Для достижения поставленной цели в результате проведенного анализа литературы сформулированы следующие научные и практические задачи настоящего исследования:

1. Разработка теоретических подходов и алгоритмов оперативного получения характеристик грунтов железнодорожного земляного полотна методами: резонансным, инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) и георадиолокации.
2. Разработка методики оперативной оценки влажности грунта и его минерального состава.
3. Разработка методики оперативной оценки концентрации модификаторов механических свойств грунтов земляного полотна.
4. Разработка способа определения дренирующих свойств песчаных грунтов земляного полотна.
5. Разработка комплексного подхода к прогнозированию накопления остаточных деформаций железнодорожного земляного полотна.

## **1.6 Методы измерения влажности для обеспечения соответствия новым техническим требованиям при проектировании**

В перспективных нормативных документах, регламентирующих строительство земляного полотна, формулируются новые требования к контролю качества материалов, используемых для выполнения строительных работ. Данный раздел посвящен обзору методов определения влажности грунтов для строительства и ремонта земляного полотна и решению поставленной задачи:



«Анализ обычно применяемых методов определения влажности грунтов и выбор из их числа необходимых для решения поставленных в диссертации задач».

### ***1.6.1 Методы определения влажности грунтов. Общие подходы***

Одной из главных причин деформативности земляного полотна железных дорог является переувлажнение грунтов и скопление влаги в местах развивающихся деформаций. Поэтому действующие и перспективные программно-аппаратные системы диагностики и мониторинга земляного полотна ориентированы на определение и анализ изменения влажности грунта в отдельных точках конструкции [54] и вдоль ее протяженных участков [55].

Обычно при построении моделей увлажненных грунтов рассматривается свободная и связанная вода. Согласно геологической классификации [56–59] свободная вода размещена в некапиллярных макропорах и трещинах породы. Она в первую очередь находится под действием гравитации. К свободной воде также принято относить воду, удерживаемую в порах и трещинах капиллярными силами. В этом случае при определении положения воды в порах рассматриваются дополнительно силы поверхностного натяжения. Связанная вода удерживается на поверхности частиц грунта за счет сил, действующих между молекулами воды и атомными комплексами поверхности грунтовых частиц [60]. Физические свойства связанной воды могут существенно отличаться от свойств свободной воды [61]. Степень отличия связана с толщиной пленки воды на поверхности минеральных частиц, которая может иметь согласно [62] значение до 8–10 Å.

### ***1.6.2 Определение влажности грунта методом высушивания до постоянной массы***

Государственный стандарт [51] регламентирует определение влажности грунтов, включая связанную, а также суммарную влажность мерзлого грунта.

Суть метода заключается в том, что пробу грунта определенной массы помещают в нагретый сушильный шкаф. Грунт высушивают до постоянной массы

при температуре  $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Загипсованные грунты высушивают при температуре  $(80 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Выбор температуры объясняется тем, что ее достаточно для удаления молекул воды с поверхности частиц грунта и недостаточно для удаления воды из структуры минерала.

Поскольку метод применяется до потери массы воды многократно, его можно считать эталонным по точности, а его погрешность в основном будет связана с погрешностью приборов и методов, применяемых для отбора грунта, и используемых для измерения массы весов.

Время одного измерения составляет от 5 до 10 ч, что подразумевает его использование в лабораторных условиях в продолжительный промежуток времени.



Рисунок 1.1 – Анализатор влажности MA-35, Sartorius

Вместе с этим метод высушивания может быть реализован с помощью специально сконструированных экспресс-приборов (рисунок 1.1). Применение таких приборов позволяет существенно сократить время измерений, но допускаемые при этом отклонения от технологии измерений [51] требуют дополнительных исследований точности получаемых результатов.

### ***1.6.3 Определение электрофизических характеристик и влажности грунта радиоволновыми методами***

Классификация радиоволновых методов предложена в работе [63]. В этой работе методы предлагается укрупненно разделить на волноводные резонансные и методы свободного пространства. В настоящее время радиоволновые методы измерений влажности грунтов изучены и апробированы (см., например, [64]). Пример установки, реализующий волноводный метод, представлен на рисунке 1.2.

Обзор [65] посвящен методам измерения содержания влаги в грунте. Среди возможных методов особое внимание уделено диэлектрическим методам,

георадарным технологиям, методам удельного сопротивления и спектрально-индуцированной поляризации.

В обзоре [66] рассмотрены и проанализированы некоторые радиоволновые методы измерений, среди которых рефлектометрия во временной области, метод передачи, резонансные методы, методы емкостных ячеек. При выборе метода определения влажности грунтов земляного полотна важно учитывать диапазон ее изменения, поскольку методы измерения образцов с небольшой влажностью могут оказаться непригодными для образцов с высокими значениями. Справедливо и обратное утверждение. Методы, созданные для определения влажности вблизи пределов текучести грунтов, могут оказаться неприменимыми для грунтов с низкой влажностью. Конкретный выбор метода и аппаратуры для измерений определяется рядом факторов, к которым можно отнести особенности конструкции диагностируемого объекта и решаемой задачи, условия проведения эксперимента, частотный диапазон, фазовый состав и свойства исследуемого материала, температуру и др.



Рисунок 1.2 – Портативный СВЧ-анализатор Keysight N9918A, 26,5 ГГц

Например, диагностика состояний грунтов в насыпи разрушающими методами может быть осуществлена комплексом мероприятий, включающих бурение скважин, отбор грунта и радиоволновые измерения. Вместе с этим рефлектометрия во временной области и метод передачи могут применяться только к грунтам нарушенного строения, в то время как резонансные методы и методы емкостных ячеек допускают возможность диагностики с сохраненной структурой. Очевидно, что такой

подход обоснованно применять на этапе проведения предпроектных изысканий, локальной диагностики в процессе обследований земляного полотна, а также для верификации результатов диагностики и мониторинга с применением геофизических методов.

Организацию диагностики и мониторинга земляного полотна на протяженных и локальных участках пути можно выполнить геофизическими методами и оптическими радиоволновыми методами.

#### ***1.6.4 Модель увлажненного грунта***

Свойства увлажненных грунтов зависят от свойств минерального каркаса и степени увлажнения. При этом нужно учитывать, что соотношение диэлектрических проницаемостей минерального каркаса и связанной на поверхности минеральных частиц воды и воды в свободном состоянии можно качественно характеризовать соотношением 1:10–20. Значение этого отношения, помимо прочего, зависит от частоты, на которой проводится исследование, но его можно применять для анализа методов, обычно используемых при диагностике насыпей и иных объектов земляного полотна.

Для учета особенностей минералов грунта используются модели, в самой простой из которых грунт рассматривается как однородная структура, имеющая свои макроскопические характеристики [67, 68]. При увлажнении таких грунтов молекулы воды первоначально размещаются на поверхностях минеральных частиц, а затем заполняют свободное пространство между ними.

В исследованиях [69, 70] показано, что диэлектрическая проницаемость при положительных температурах может быть представлена в зависимости от величины увлажнения полиномом третьей степени. В этих исследованиях показано, что коэффициенты полинома зависят от состава минеральной матрицы, и получены их численные значения для многих типов грунтов. Измерения проводились с использованием лабораторных установок, что не всегда удобно при выполнении работ по диагностике и мониторингу влажности земляного полотна в полевых условиях.

### ***1.6.5 Диэлькометрические методы определения влажности***

Для измерения и контроля локальных участков наличия влажности грунтов в настоящее время сконструирован широкий спектр приборов-влажномеров. В качестве измерительной ячейки в них используются плоские или цилиндрические конденсаторы, в которые помещается исследуемый грунт, как правило, нарушенного строения.

Диэлькометрические методы измерения влажности основаны на корреляционных соотношениях электрофизических параметров грунтов в зависимости от влажности [71].

Измерения диэлькометрическими методами обычно проводят в области высоких частот. Выбор высоких частот объясняется рядом экспериментальных



Рисунок 1.3 –  
Октанометр SHATOX  
SX-150

обстоятельств, к которым можно отнести в первую очередь попытку избавиться от окисления электродов, наблюдаемого на постоянном токе. В процессе измерений устанавливается емкость измерительной головки, заполненной грунтом, а при обработке результатов измерений определяется его диэлектрическая проницаемость (рисунок 1.3).

К недостаткам высокочастотных методов можно отнести зависимость результатов измерения от удельной электропроводности образца, которая связана с высвобождением обменных ионов из глинистых частиц при увеличении влажности.

### ***1.6.6 Кондуктометрические методы определения влажности***



Рисунок 1.4 –  
Кондуктометр  
COM20

В основе кондуктометрического метода определения влажности лежит зависимость электрической проводимости материала от влажности [72]. Приборы, реализующие этот метод измерений (рисунок 1.4), позволяют сопоставлять величину проводимости и влажность с использованием тарифовочной зависимости, которая выбирается для групп образцов, близких по структуре минерального состава или внутреннего строения иной природы.

При интерпретации результатов измерений следует учитывать их зависимость от температуры, химического состава обменных ионов, плотности образца.

Приборы (см. рисунок 1.4), основанные на этом методе контроля, не обладают высокой точностью измерения и используются в основном в качестве индикаторов.

#### ***1.6.7 Метод ИК-спектроскопии для определения влажности***

В основе применения метода ИК-спектроскопии (рисунок 1.5) для определения влажности грунтовых образцов лежат технологии фазового анализа.



Рисунок 1.5 – ИК  
Фурье-спектрометр  
Bruker ALPHA II

Обычно для анализа спектров минералов методом ИК-спектроскопии используется область среднего ИК-диапазона ( $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ ), потому что этот диапазон содержит полосы, достаточно контрастные для проведения анализа. Экспериментальные исследования могут выполняться по разным методикам, но наиболее просто реализуется спектроскопия полного отражения (IR-ATR), хорошо зарекомендовавшая себя при решении задач качественного и количественного анализа [73].

Важным элементом в процедуре определения влажности является математическая обработка результатов измерений. В настоящее время она

выполняется с применением многомерных алгоритмов с применением современных ЭВМ. В работе [73] для идентификации минералов использован дискриминантный анализ (ДА), относящийся к многомерным статистическим методам, реализованным с использованием программного обеспечения TQ Analyst (ThermoScientific, США). В указанной работе отмечается, что многомерные статистические методы способны извлечь необходимую спектральную информацию из ИК-спектров и исследовать эту спектральную информацию для качественного или количественного анализа, включая фазовый.

В работе [74] анализ результатов экспериментальных измерений выполнен многомерным методом разложения экспериментальных результатов по базисным спектрам  $H_2O$  и использованных минералов.

### ***1.6.8 Метод георадиолокации***

Метод георадиолокации относится к радиоволновым оптическим методам неразрушающего контроля, широко применяемым для обследования подповерхностного пространства при решении широкого круга инженерных задач [75–76]. Применение метода для обследования земляного полотна железных дорог в нашей стране было начато в МИИТе и ВНИИЖТе в конце прошлого столетия. Результаты исследований научных сотрудников этих учреждений позволили создать нормативную базу для применения метода на сети железных дорог. В начале нашего столетия эта нормативная база была переработана сотрудниками РГУПС. В результате этой работы метод георадиолокации был принят в эксплуатацию и занял подобающее место в системе наблюдений за состоянием балластного слоя и земляного полотна железных дорог.

Развитие и применение георадиолокационного метода на железных и автомобильных дорогах в последние годы связано с работами А. Г. Круглого, Е. С. Ашпиза, Н. П. Семейкина, В. В. Помозова, В. А. Явны, В. И. Грицыка, В. Л. Шаповалова и др.

Широкое использование метода георадиолокации на транспорте объясняется возможностью диагностировать состояние грунтовых слоев с высокой скоростью



Рисунок 1.6 – Размещение антенн георадара в составе лаборатории

и с относительно высоким разрешением и создавать программные методы автоматической обработки (рисунок 1.6).

В работе [77] метод георадиолокации использован для диагностики земляного полотна методом анализа показателя преломления и проводимости.

В работе [78] разработан георадиолокационный метод определения сезонных изменений влажности земляного полотна, особенностью которого является отсутствие необходимости комплексирования с другими геофизическими или разрушающими методами обследования. В работе [79] составлен комплекс методов, включающий георадиолокацию и резонансный метод измерения показателя преломления и удельного сопротивления. Комплекс направлен на экспресс-диагностирование протяженных объектов.

В работе [80] плотность грунта определяется по данным радарограмм. В работе [81] предложено локализовать морозочувствительные суббалластные и грунтовые слои с помощью методик частотного георадиолокационного анализа.

Методы георадиолокации могут успешно применяться в практике строительства земляного полотна для контроля влажности конструктивных слоев, приготовленных для уплотнения. Близкие по содержанию исследования выполнены в работах [82–83], где этим методом определены гидравлические параметры песчаного грунта, оценена способность гомогенных почв удерживать воду.

### 1.7 Выводы. Выбор методов для решения поставленных задач

Основная проблема в определении влажности с использованием корреляционных зависимостей связана с принципиально нелинейным изменением электрофизических свойств образцов при ее изменении.



Рассмотрим поэтапное увлажнение первоначально сухого грунта. До внесения молекул воды все электрофизические характеристики образца (например, диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость) определяются свойствами минералов, его образующих. Добавление молекул воды приводит к образованию слоя воды на поверхности минералов. А поскольку, как отмечалось выше, диэлектрическая проницаемость связанных молекул воды близка к диэлектрической проницаемости самих минералов, это приводит к незначительному изменению диэлектрической проницаемости образца и заметному изменению удельной проводимости [61, 84, 85].

При этом к каналу проводимости, определяемому свойствами минералов, добавляется канал, связанный с ионной проводимостью по поверхности минералов. В качестве ионов могут выступать обменные ионы, покидающие глинистые частицы при увлажнении. Этот эффект, получивший название эффекта Максвелла – Вагнера, проявляется в гетерогенных грунтах, состоящих из двух или более отдельных фаз, каждая из которых характеризуется собственными диэлектрической проницаемостью и проводимостью, и заметен даже при низкой влажности (до 10 %), если грунт содержит гипс.

Дальнейшее увеличение влажности приводит к переходу образца через особую точку – влажность на пределе раскатывания, после которой поры в грунтах начинают заполняться водой. Этот интервал характеризуется заметным ростом значений диэлектрической проницаемости в диапазоне от низких частот до СВЧ, обычно используемых в практике георадиолокации. Такое поведение диэлектрической проницаемости, как отмечалось выше, объясняется большим значением диэлектрической проницаемости свободной воды. Одновременно для удельной проводимости открывается новый канал, связанный с объемным протеканием тока.

Исторически первой моделью удельной проводимости была линейная модель [86]. В работе [87] показано, что добавление 2 % раствора NaCl приводит к росту удельной проводимости с превышением предела раскатывания. Если результаты измерений выше предела раскатывания аппроксимировать линейной зависимостью

по аналогии с [86], то зависимость удельной проводимости в широком диапазоне влажностей будет представлена двумя прямыми, с точкой пересечения, расположенной вблизи предела раскатывания. Вблизи нуля влажности зависимость проводимости от влажности носит квадратичный характер [87].

Нелинейный характер размерных и электрофизических (на звуковых частотах) характеристик глинистых грунтов исследован в работе [88]. В диапазоне СВЧ-излучения нелинейные зависимости диэлектрической проницаемости от влажности исследованы в [61].

В таблице 1.1 приведены возможные методы определения влажности, рассмотренные выше.

Таблица 1.1 – Методы определения влажности грунта и их достоинства

№ п/п	Метод	Достоинства	Недостатки	Длитель- ность одного измерения, ч
1	2	3	4	5
1	ГОСТ 5180–2015	Предельно высокая точность	Лабораторное использование	5–10
2	Радиоволновые волноводные (рефлектометрия во временной области, метод передачи)	Высокая точность	Лабораторное использование, нарушенное строение и ограничение по влажности образцов	0,1
3	Радиоволновые резонансные	Высокая точность, ненарушенное строение образцов	Лабораторное использование, ограничение по влажности образцов	0,1
4	Радиоволновые методы емкостных ячеек	Высокая точность, ненарушенное строение образцов	Лабораторное использование, ограничение по влажности образцов, используются частоты ниже 10 МГц	0,1
5	Диэлькометрические методы	Высокая точность	Лабораторное использование, нарушенное строение и ограничение по влажности образцов	0,1

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4	5
6	Кондуктометрические методы	Полевое и лабораторное использование. Низкая точность. Сложность работы при низкой влажности	Зависимость точности измерений от большого количества плохо контролируемых факторов	0,05
7	Метод ИК-спектроскопии	Высокая точность, ненарушенное или нарушенное строение образцов	Лабораторное использование, ограничение по влажности образцов	0,1
8	Геофизические методы удельного сопротивления и спектрально-индуцированной поляризации	-	Полевое использование затруднено железнодорожным трафиком и высоким уровнем помех	-
9	Радиоволновые методы свободного пространства. Метод георадиолокации	Высокая точность, ненарушенное строение образцов. Возможность диагностировать протяженные участки пути, может использоваться на подвижных экипажах	Определенный тип аппаратуры, высокая квалификация персонала.	Зависит от протяженности участка и числа параметров

При проведении исследований в данной работе в качестве критериев выбора метода измерения выбраны следующие:

- исследования в лабораторных условиях должны выполняться с максимальной точностью;
- разработка экспресс-технологий, требующая выполнения большого количества измерений за ограниченное время, допускает применение метода высушивания с использованием специализированных приборов;
- допустимо использование корреляционных зависимостей, верифицированных несколькими независимыми методами;
- необходимо использовать методы, допускающие получение характеристик грунтов ненарушенного строения из керна.

В таблице 1.2 приведены методы измерений влажности, использованные в данной работе при решении задач исследования.

Таблица 1.2 – Методы измерений влажности грунтов и решаемые задачи

№ п/п	Метод	Решаемая задача
1	ГОСТ 5180–2015	Определение классификационных характеристик связных грунтов при предпроектных обследованиях. Определение качества уплотнения при выполнении строительных работ
1a	Метод высушивания	Используется как дополнительный метод для оценки точности разработанных методик
2	Радиоволновые волноводные (рефлектометрия во временной области, метод передачи)	Используются как дополнительные методы для оценки точности разработанных методик
3	Радиоволновые резонансные	Применение в разработанных методиках для верификации результатов георадиолокационных измерений в диапазоне $\varepsilon < 30$
4	Радиоволновые методы емкостных ячеек	Не используются из-за низкой частоты возбуждения
5	Диэлькометрические методы	Не используются из-за ограниченности базы корреляционных соотношений между диэлектрической проницаемостью и влажностью
6	Кондуктометрические методы	Не используются из-за низкой точности
7	Метод ИК-спектроскопии	Используется в разрабатываемых методиках определения влажности и входного контроля качества связных материалов совместно со специально разработанным математическим обеспечением
8	Геофизические методы удельного сопротивления и спектрально-индуцированной поляризации	Не используются из-за высокой зашумленности объекта исследования и трафика на действующих участках железнодорожного пути, продолжительности измерений и необходимости использования многократно для каждого конструкционного слоя при строительстве
9	Радиоволновые методы свободного пространства. Метод георадиолокации	Используются в разрабатываемых методиках: определения влажности и плотности конструктивных слоев при подготовке к строительным процедурам; технологического контроля и контроля качества строительства. Используется специализированное математическое обеспечение

## **2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

Контроль влажности грунтовых материалов при возведении земляного полотна является критически важным компонентом управления качеством строительства, поскольку непосредственно влияет на достижение нормативных значений по уплотнению. Как известно, строительство должно выполняться из грунтовых материалов с оптимальной влажностью или близкой к ней. Кроме того, в засушливые периоды года необходимо выполнять специальные мероприятия по увлажнению, а в дождливые, выполнять регулирование стока или технологические паузы для естественного и искусственного (с применением активных/неактивных добавок) осушения. Исходя из этого вопрос оперативности и точности определения влажности грунтовых строительных материалов, с учетом их разнообразия, остается открытым, поскольку нормативной документацией предусматривается использовать методику дискретных полевых измерений устройствами с недостаточной точностью для обеспечения однородного уплотнения грунтов тела насыпи. По этой причине в данной главе решена задача оперативного контроля влажности грунтов усовершенствованными методами инфракрасной спектроскопии, георадиолокации и резонансных измерений.

### **2.1 Резонансный метод определения влажности грунтов**

Возможность применения резонансного метода измерений влажности грунтов, конструктивные особенности, а также его преимущества относительно стандартных методов измерений, изложены в работах [61, 79, 84, 85, 88, 89].

Для выполнения резонансных измерений применяется измерительный комплекс (рисунок 2.1), в состав которого входят измеритель модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-04 (рисунок 2.1, а), латунный резонатор, в котором размещен контейнер для образцов (рисунок 2.1, б), и компьютер со специализированным программным обеспечением (рисунок 2.1, в) [61, 79]. Основная идея резонансного метода состоит в получении градуировочных

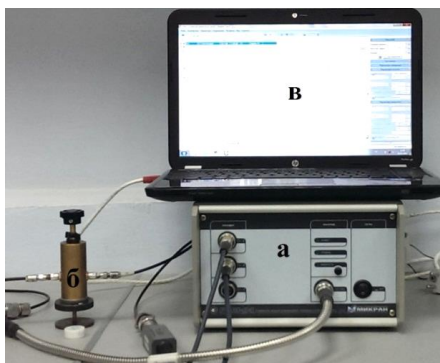


Рисунок 2.1 – Аппаратура  
для выполнения  
резонансных измерений

зависимостей диэлектрической проницаемости грунта от влажности с учетом результатов компьютерного моделирования и экспериментальных измерений резонансных частот для эталонных образцов с известным значением диэлектрической проницаемости. Вместе с этим авторам вышеуказанных работ не удалось преодолеть ряд ограничений: конструктивные особенности резонатора лимитируют диапазон измеряемых значений диэлектрической проницаемости до 30, низкая степень автоматизации обработки данных, а также отсутствие эталонных материалов с  $\varepsilon > 6$  ограничивают диапазон построения и верификации градуировочной зависимости в виде:

$$f = y_0 + A_0 e^{-\frac{\varepsilon}{t}}. \quad (2.1)$$

Поскольку указанные пределы измерений непосредственно сказываются на диапазоне измеряемой влажности грунтов до 7 %, что снижает практическую значимость метода для контроля свойств грунтов, в данной работе за счет автоматизации обработки данных и комплексирования резонансного метода с радиоволновым эти ограничения были преодолены.

На первом этапе исследований «таблетки» эталонных образцов с гарантированным значением диэлектрической проницаемости увлажнялись дистиллированной водой. Масса воды определялась с точностью (0,01 %), а диэлектрическая проницаемость оценена значением 70 на частоте 1400 МГц. Вода учитывалась при определении диэлектрической проницаемости вещества. Таким образом удалось расширить интервал верифицированных значений с верхней границей  $\varepsilon = 10$ . На рисунке 2.2, А приведены результаты аппроксимации (красная сплошная линия) результатов измерений диэлектрической проницаемости таблеток эталонных образцов и их комбинаций (черные квадраты), а также

величина погрешности результатов измерений (вертикальные отрезки) 1 %. Таким образом, проблема переносится на применение градуировочной зависимости вида 2.1 в область ее экстраполяции с  $\varepsilon > 10$ .

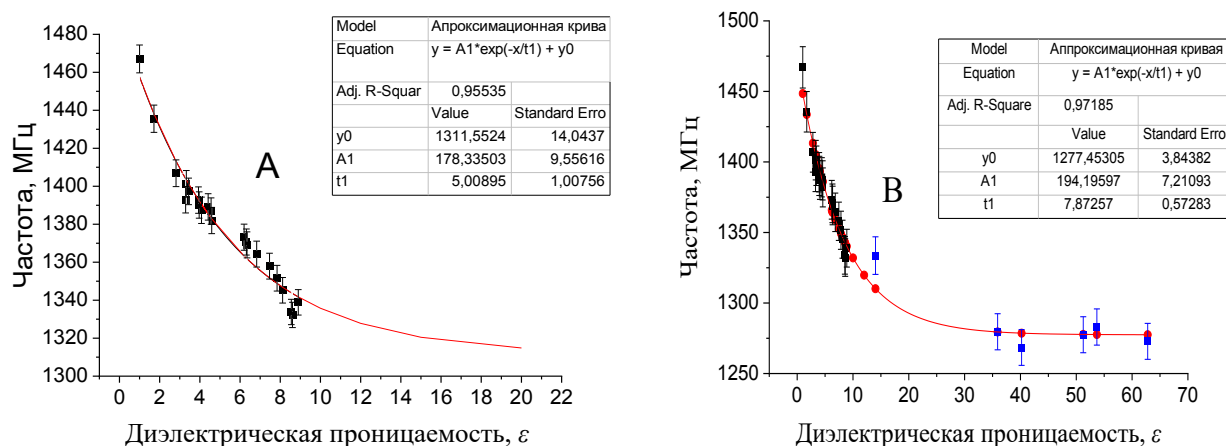


Рисунок 2.2 – Градуировочная зависимость аппаратуры резонансного метода

Определение точности этой процедуры выполнено путем сравнения данных, полученных резонансным и радиоволновым методами. Последний реализован с помощью прибора Keysight N9918A.

Результаты измерений радиоволновым методом приведены на рисунке 2.2, В (синие квадраты), а черные квадраты, как и на рисунке 2.2, А, соответствуют результатам измерений эталонных образцов резонансным методом. Также на рисунке 2.2, В красной линией выделены результаты аппроксимации экспериментальных данных, полученных резонансным методом для эталонных образцов и с применением прибора Keysight N9918A. Полученные коэффициенты аппроксимации (представлены на рисунке 2.2, А и В) для функции вида (2.1) использованы для расчета электрофизических величин исследуемых образцов.

С целью проверки точности полученных результатов выполнены сравнительные измерения диэлектрической проницаемости бентонитовой глины, которой заполнялся объем измерительной части оборудования, в естественно сухом состоянии без уплотнения. Марки бентонитов и результаты измерений представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения диэлектрической проницаемости бентонитов

Бентонит	Частота, МГц	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$		Погрешность $\delta$
		определенная резонансным методом	определенная радиоволновым методом прибором Keysight N9918A	
Zir	1390,97	4,66	4,7	< 10 %
Kutch	1395,241	4,25	3,3	
Dush	1385,88	5,17	5,0	

Видно, что средняя погрешность результатов измерений не превышает 10 %, что может объясняться погрешностью пробоподготовки. Достигнутое удовлетворительное соответствие данных, полученных резонансным методом и с помощью прибора Keysight N9918A (погрешность не превышает 10 %), позволило расширить диапазон измерений диэлектрической проницаемости для высоковлажных образцов.

С целью расширения верхнего предела градуировочной зависимости был проведен эксперимент с бентонитом марки Kutch. Образцам грунта задавалась массовая влажность 25, 50, 70, 140, 200 и 300 %. Для каждого значения влажности производилось измерение диэлектрической проницаемости на высокочастотном анализаторе Keysight N9918A. Полученные данные представлены на рисунке 2.2, В в виде синих квадратов.

Добавление этих экспериментальных точек позволило продлить аппроксимационную кривую (красная линия на рисунке 2.2, В) в область высоких значений диэлектрической проницаемости. В результате верхняя граница определяемых значений диэлектрической проницаемости была смещена с  $\epsilon = 10$  до  $\epsilon = 62,8$ , что существенно расширяет практическую значимость методики для контроля влажности грунтов в широком диапазоне.

Важно отметить, что, несмотря на расширение диапазона построения градуировочной зависимости, прямое измерение образцов с высокой влажностью резонансным методом ограничено конструктивными особенностями резонатора, которые устанавливают верхний предел измеряемой диэлектрической проницаемости значением  $\epsilon = 30$ . Однако комплексное использование



резонансного и радиоволнового методов позволяет обойти это ограничение. Для образцов, чья диэлектрическая проницаемость, измеренная резонансным методом, приближается к 30, дальнейший рост влажности может быть оценен с использованием расширенной градуировочной зависимости, построенной по данным прибора Keysight N9918A. Таким образом, была решена задача определения диэлектрической проницаемости (и, соответственно, влажности) грунтов в широком диапазоне, недоступном для измерений резонансным методом.

### 2.1.1 Автоматизации обработки данных

Для сокращения времени, затрачиваемого на обработку экспериментальных данных, в данном исследовании создан программный продукт Moisture calculator,

выполняющий две функции: корректировку градуировочной кривой и аппроксимационной функции соответственно, а также расчет диэлектрической проницаемости грунтового образца.

Интерфейс ПО Moisture calculator диалогового типа приведен на рисунке 2.3. Левая часть интерфейса относится к модулю, который содержит информацию о геометрических

Рисунок 2.3 – Интерфейс калькулятора для расчета диэлектрической проницаемости параметров контейнера и «таблеток» эталонного образца, количестве и материале таблеток. В правой части интерфейсного окна продемонстрирован результат работы алгоритма подбора аппроксимационной функции и соответствующих коэффициентов для выражения (2.1) и построения графика, приведенного на рисунке 2.2, которые используются далее для определения диэлектрической проницаемости образца по частоте его резонанса.

## **2.2 ИК-метод определения влажности грунтов**

Отмеченное выше ограничение диапазона измеряемых значений диэлектрической проницаемости ( $\epsilon < 30$ ) резонансным методом преодолено за счет создания технологии определения влажности грунтов, базирующейся на методе ИК-спектроскопии.

Технология предусматривает реализацию обычно применяемой при измерениях экспериментальной процедуры, основные этапы которой будут описаны ниже.

### ***2.2.1 Экспериментальная часть технологии***

Исследование инфракрасных спектров выполнено методом нарушенного полного внутреннего отражения с использованием ИК Фурье-спектрометра ALPHA фирмы Bruker Optics (Bruker Optik GmbH, Germany) и модуля ALPHA-E по технологии нарушенного полного внутреннего отражения. Инфракрасные спектры сняты в среднем инфракрасном диапазоне от 500 до 4000  $\text{см}^{-1}$  с использованием программного обеспечения OPUS (Bruker Optics GmbH, Ettlingen, Germany). Режим съемки: разрешение – 2  $\text{см}^{-1}$  и усреднение по 25 сканам. Исследованию подвергалась естественная поверхность грунтового образца, размещенного на кристалле ZnSe, имеющего площадь 19,6  $\text{мм}^2$ . Грунтовые образцы предварительно размельчались в фарфоровой ступке и просеивались через сито 1 мм. Для проведения ИК-измерений плотных грунтов и механически прочных минералов, таких как кварцевый песок, граниты, мрамор, выполнялась предварительная пробоподготовка – измельчение в шаровой мельнице МГ-1 (Futurum, Санкт-Петербург, Россия). Мельница позволяет обрабатывать от 50 до 300 г материала и гарантирует конечную фракционную тонкость размола около 200 мкм.

### ***2.2.2 Теоретическая часть технологии***

Разработанный в данной работе теоретический метод обработки ИК-спектров базируется на хорошо апробированном подходе [74], основные положения которого приведем ниже.

Пусть ИК-спектр анализируемого образца ( $\psi$ ) представляет собой линейную комбинацию базисных спектров ( $\{\varphi_i\}$ ):

$$\psi = \sum_i \alpha_i \varphi_i, \quad (2.2)$$

где индекс  $i$  нумерует базисные спектры.

Линейное приближение часто используется при решении аналогичных задач. Так, например, в работе [90] линейная модель использована для анализа спектра рентгеновской дифракции (XRD), а в [91] предложен количественный ИК-метод, который основан на ручном сложении спектров.

Вклады  $\alpha_i$  отдельных спектров используемого базисного набора  $\varphi_i$  определяются системой алгебраических неоднородных уравнений:

$$\sum_i \alpha_i S_{ij} = S_j, \quad (2.3)$$

где  $S_{ij} = \int \varphi_i \cdot \varphi_j dk$ ,  $S_j = \int \psi \cdot \varphi_j dk$ , а интегрирование проводится по волновому числу в области анализируемого спектрального интервала.

Система (2.3) решена с использованием процедуры LSADS из Международной математической библиотеки подпрограмм IMSL. Входящая в систему линейных неоднородных уравнений (2.3) симметричная матрица  $S_{ij}$  вычислена на нормированном базисе:

$$\varphi_i(k) \rightarrow \varphi_i(k) / \int \varphi_i(k) dk \quad (2.4)$$

и является положительно определенной.

### ***2.2.3 Определение влажности глинистых грунтов***

Усовершенствование ИК-метода определения влажности глинистых грунтов, выполненное в данной части работы, связано с распределением молекул воды на частицах глинистых минералов.

С этой целью в базисный набор спектров ( $\{\varphi_i\}$ ), необходимый для решения системы алгебраических неоднородных уравнений (2.3), для полиминерального образца неизвестной/определяемой влажности включены спектры

мономинеральных образцов известной влажности. Они несут информацию о влажности отдельных частиц минерала, что позволяет дополнить резонансный метод и определять влажность грунта свыше 25 %. В качестве примера рассмотрим полиминеральный образец, полученный путем смешивания равных масс каолинита KGa-1b и монтмориллонита STx-1b. На рисунках 2.4–2.5 приведены измеренные ИК-спектры воды и использованных минералов при разных значениях влажности, а на рисунке 2.6 приведены ИК-спектры смеси этих минералов (1:1 по массе) при разных значениях влажности.

Далее рассмотрим решение системы алгебраических неоднородных уравнений (2.3) для спектров смеси каолинита и монтмориллонита 0,5K+0,5M различной влажности, включая в набор базисных спектров, кроме спектра воды, все спектры влажных образцов каолинита и монтмориллонита, приведенные на рисунках 2.4 и 2.5.

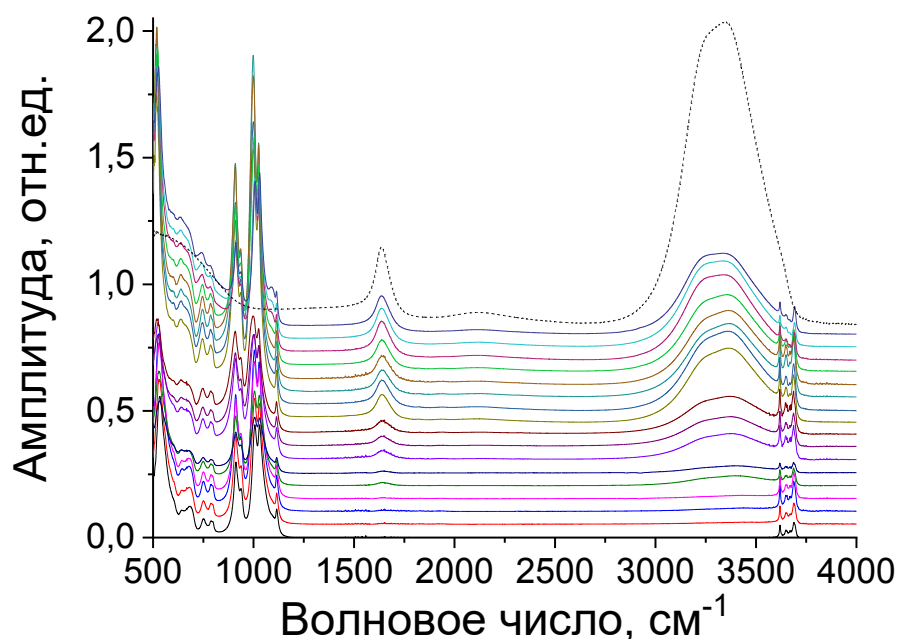


Рисунок 2.4 – ИК-спектры каолинита KGa-1b при влажности ( $W$ , %):  
0, 3, 6, 9, 15, 18, 20, 25, 30, 32, 35, 40, 50, 60, 65, 70, 80 (снизу вверх)  
и  $H_2O$  (пунктирная линия)

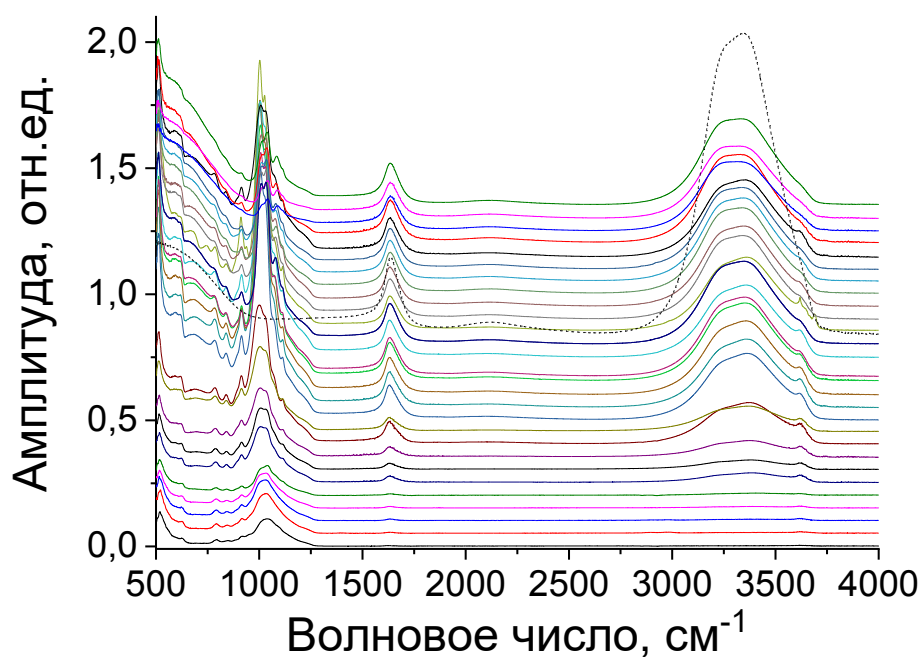


Рисунок 2.5 – ИК-спектры монтмориллонита STx-1b при влажности ( $W$ , %): 0, 3, 6, 9, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 95, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 (снизу вверх) и  $H_2O$  (пунктирная линия)

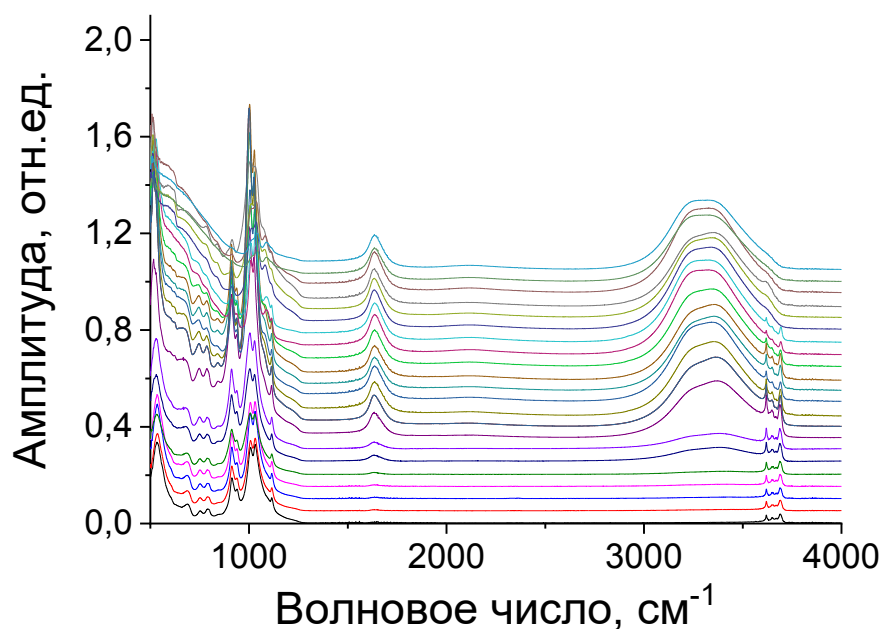


Рисунок 2.6 – ИК-спектры 50 % смеси каолинита KGa-1b и монтмориллонита STx-1b при влажности ( $W$ , %): 0, 3, 6, 9, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 160, 170, 180, 190 (снизу вверх)

Для каждого спектра смеси при данной влажности смеси  $W_{\text{mixt}}$  определены влажности  $W_{\text{basic}}^{\max \alpha}$  образцов каолинита и монтмориллонита ( $\alpha$  – коэффициент разложения), базисные спектры которых дали максимальный вклад в разложение (2.2) спектра смеси. Значения  $W_{\text{basic}}^{\max \alpha}$  для смеси каолинита и монтмориллонита при разных влажностях смеси представлены на рисунке 2.7, где использованы следующие обозначения: ■ – влажность, определенная при изготовлении образцов; ● – влажность образца каолинита, базисный спектр которого дал максимальный вклад в разложение (2.2); ● – влажность образца монтмориллонита, базисный спектр которого дал максимальный вклад в разложение (2.2); ■ – полусумма значений влажности образцов каолинита и монтмориллонита, упомянутых выше; ○ – влажность образца каолинита в области предела текучести, базисный спектр которого дал максимальный вклад в (2.2); ○ – влажность образца монтмориллонита в области предела текучести, базисный спектр которого дал максимальный вклад в (2.2). Значения влажности на границах текучести каолинита ( $W_L^K$ ) и монтмориллонита ( $W_L^M$ ) [92, 93] указаны горизонтальными линиями. Вертикальными отрезками показаны погрешности 10 %.

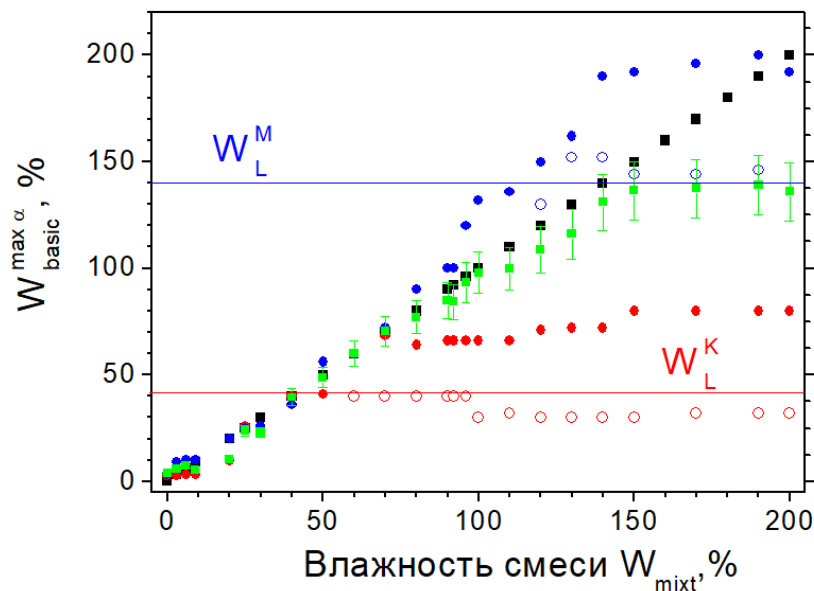


Рисунок 2.7 – Значения влажности образцов каолинита и монтмориллонита, базисные спектры которых дали максимальный вклад в разложения спектров смеси каолинита и монтмориллонита. Расшифровка обозначений дана в тексте

На рисунке 2.8 видно, что оптимальная сходимость полусуммы (■) влажностей каолинита и монтмориллонита с влажностью, использованной при изготовлении образцов (■), наблюдается до значений 140–150 %, близких к значению влажности на границе текучести монтмориллонита. При интерпретации полученных результатов (см. рисунок 2.7) необходимо учитывать, что спектры образцов с влажностью выше предела текучести могут отражать особенности гравитационного отжатия воды, протекающего в процессе экспериментального исследования. В этом случае спектр образца представляет собой наложение спектров минералов на границе текучести и спектра свободной воды. В образце каолинита ( $50 \% < W_{\text{mixt}} < 140 \%$ ) лишняя вода уходит к частицам монтмориллонита. В образце монтмориллонита при ( $W_{\text{mixt}} > 140 \%$ ) лишняя вода создает неопределенность в интерпретации.

Таким образом, решение задачи (2.3) [74] с базисным набором, содержащим спектры влажных минералов, позволило исследовать перераспределение молекул воды между глинистыми частицами разного генезиса и оценить величину влажности на границе текучести минералов. При влажности смеси минералов, не превышающей 50 %, получено, что наиболее вероятная влажность частиц монтмориллонита больше, чем частиц каолинита, что не противоречит результатам теоретических исследований других авторов. Представленный метод расширяет возможности резонансного метода [61, 79] до значений влажности, при которых начинает «отжиматься» свободная вода.

### 2.3 Георадиолокационный метод определения влажности грунтов

Строительство земляного полотна железных дорог, а также высокоскоростных железных дорог предусматривает уплотнение конструктивных грунтовых слоев до значения коэффициента уплотнения близкого к единице. Достижение такого показателя возможно только при доведении влажности грунта до оптимальной как по длине, так и по глубине уплотняемого слоя. В соответствии с действующими нормативными документами влажность используемого материала определяется лабораторными методами в

отдельных, локальных точках, что не гарантирует достижения проектных показателей по всему фронту строительства объекта.

Таким образом, непрерывное определение влажности грунта по глубине в продольном и поперечном сечениях является важной технологической задачей при строительстве земляного полотна железных дорог.

Наиболее перспективным неразрушающим методом решения этой задачи является *метод георадиолокации*. Получаемая с помощью этого метода непрерывная информация позволяет оценивать влажность среды по следующим характеристикам СВЧ-излучения: амплитуде сигнала, отраженного грунтовым слоем, коэффициенту затухания, амплитуде сигнала, отраженного границами раздела грунтовых слоев, частоте и ее изменении, сдвигу фаз и поляризации.

Данный раздел диссертационного исследования посвящен разработке георадиолокационного метода определения влажности конструкционного слоя, базирующегося на измерении амплитуды электромагнитного сигнала, отраженного от границ раздела конструктивных слоев земляного полотна, и определении коэффициента ослабления электромагнитного излучения.

Рабочий процесс состоит из следующих этапов:

- 1) предварительная тарировка георадиолокационной аппаратуры;
- 2) размещение георадиолокационной аппаратуры непосредственно на поверхности контролируемого объекта или на подвижной единице строительной техники;
- 3) выполнение георадиолокационного профилирования и получение радарограмм;
- 4) обработка радарограмм и получение значений амплитуд сигналов, отраженных от верхнего слоя, для расчета показателя преломления грунтовой среды;
- 5) определение влажности грунтового материала по зависимости показателя преломления от значения влажности, полученного в результате тарировки георадара.



### 2.3.1 Тарировка георадиолокационной аппаратуры: теоретическая часть

В случае нормального падения электромагнитного излучения на границу раздела сред уравнение для амплитуды электромагнитной волны, отраженной от верхней границы конструкционного слоя ( $E_1$ ), имеет вид [94]:

$$E_1 = E \frac{n-1}{n+1}, \quad (2.5)$$

где  $E$  – амплитуда падающей на границу раздела сред электромагнитной волны;  $n$  – абсолютный показатель преломления среды. Показатель преломления воздуха принят равным единице. Предположим, что антенный блок размещен на некотором расстоянии от отражающей поверхности и угловую расходимость электромагнитного излучения рупорного антенного блока можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. Обоснование этого предположения выполнено в работе [7]. Допустимость предположения будет определена ниже при сравнении результатов расчета и эксперимента. Тогда выражение (2.5) можно представить в виде:

$$E_1 = E_0 e^{-2ph} \frac{n-1}{n+1}, \quad (2.6)$$

где  $E_0$  – амплитуда волны источника;  $p$  – коэффициент затухания электромагнитной волны, связанный с угловым расхождением излучения;  $h$  – расстояние от антенного блока до отражающей поверхности; использованный экспоненциальный множитель позволяет учесть расхождение показателей электромагнитного излучения, падающего на поверхность конструкционного слоя и отраженного от нее. Для расчета амплитуды электромагнитной волны, отраженной от нижней границы конструкционного слоя ( $E_2$ ), учтем в уравнении (2.6) дополнительные преломления на верхней границе, отражение от нижней границы и затухание электромагнитных волн в материале конструкционного слоя. Тогда вместо (2.6) получим:

$$E_2 = E_0 e^{-2ph} \frac{4n}{(n+1)^2} e^{-2p_1 h_1} \frac{n-n_1}{n+n_1}, \quad (2.7)$$

где  $n_1$  – показатель преломления среды, расположенной ниже конструкционного слоя, для которого использованы следующие параметры:  $n$  – показатель преломления;  $h_1$  – толщина;  $p_1$  – коэффициент затухания электромагнитного излучения. Определение коэффициента затухания электромагнитного излучения можно выполнить экспериментально, измеряя амплитуды электромагнитных волн, отраженных от нижней границы грунтовых слоев разной толщины, например  $h_1$  и  $h_2$ . В этом случае из (2.6) получим уравнение для расчета коэффициента затухания в грунтовом слое:

$$\frac{E_2(h_1)}{E_2(h_2)} = e^{-2p_1(h_1-h_2)}. \quad (2.8)$$

### ***2.3.2 Тарировка георадиолокационной аппаратуры: экспериментальная часть***

Для измерения амплитуды отраженного сигнала использованы георадары серии «Око»: шестиканальный блок регистрации № 027 с рупорными антенными блоками с частотой генерации 1700 МГц (антенные блоки № 277, № 278) и трехканальный блок регистрации № 003 с рупорным антенным блоком с частотой генерации 1700 МГц (антенный блок № 158). При измерениях на определенной высоте размещения антенного блока над поверхностью конструкционного слоя регистрировались радарограммы, сформированные из 20 трасс, каждая из которых усреднялась по 32 независимым измерениям при развертке 24 нс. Обработка экспериментальных радарограмм, полученных в данной работе, включающая подавление низкочастотных и высокочастотных помех и вычисление огибающей трассы, выполнена однотипно, с использованием программного пакета Geoscan32, разработанного ООО «Логис».

Тарировка выполнялась методом сопоставления результатов расчета амплитуды электромагнитной волны, отраженной металлическим листом большой площади при различной высоте размещения антенного блока над его границей, с результатами соответствующих измерений. Учтем при расчетах амплитуды отраженной волны, что показатель преломления металла значительно больше

показателя преломления воздуха ( $n \gg 1$ ), тогда из (2.5) получим выражение для тарировки антенных блоков:

$$E_1 = E_0 e^{-2ph}. \quad (2.9)$$

Выполненный для тарировки эксперимент включал регистрацию восьми радарограмм в диапазоне высот размещения антенного блока над поверхностью металла от 0,20 до 0,55 м с шагом 0,05 м. Подстройка результатов расчетов к результатам измерений амплитуд отраженных верхней поверхностью металла электромагнитных волн выполнена минимизацией функционала:

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Abs(E_{1(i, \text{теор})} - E_{1(i, \text{экс})}), \quad (2.10)$$

где индекс  $i$  – нумерует использованные для расчетов и измерений высоты размещения антенного блока;  $N$  – общее число измерений;  $E_{1(i, \text{теор})}$  – определенная по формуле (2.9) амплитуда отраженного металлом сигнала при размещении антенны на высоте  $h = h_i$ ;  $E_{1(i, \text{экс})}$  – измеренная амплитуда отраженного металлом сигнала при размещении антенны на высоте  $h = h_i$ . Достижение минимизации выражения (2.10) осуществлялось оптимизацией параметров амплитуды  $E_0$  и коэффициента затухания  $p$ , входящих в выражения (2.6), (2.7). Значения оптимальных параметров антенных блоков приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Оптимальные параметры  $E_0$  и  $p$  (формула (2.9))  
использованных антенных блоков

Номер антенного блока	$E_0$	$P$
277	43 800	1,75
278	40 000	1,76
158	22 000	1,72

Полученные оптимальные параметры использованы в формуле (2.7) для расчета амплитуд отраженных сигналов для разных значений высоты размещения антенных блоков над отражающей поверхностью металла. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментом и представлены на рисунке 2.8.

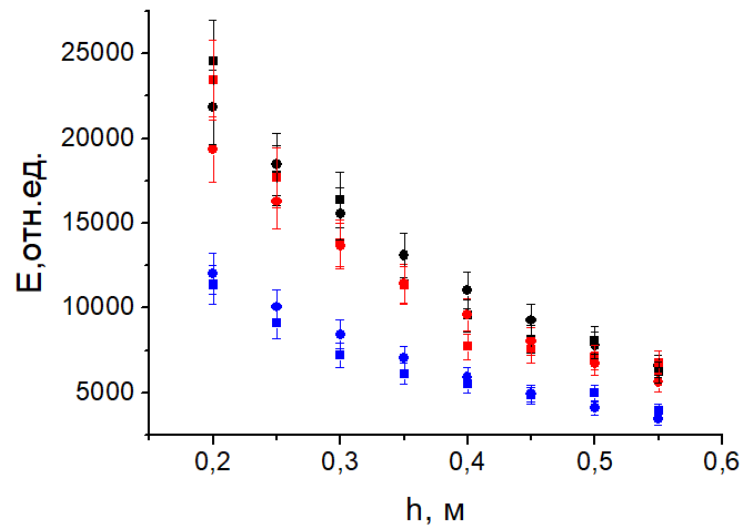


Рисунок 2.8 – Результаты тарировки антенн № 277 (■ – эксперимент, ● – теория), № 278 (■ – эксперимент, ● – теория) и № 158 (■ – эксперимент, ● – теория).

Вертикальными отрезками показаны погрешности в 10 %

### 2.3.3 Георадиолокационный метод определения влажности несвязного грунта

*Песок в естественно-сухом состоянии.* С целью проверки разработанной методики сконструирована экспериментальная установка, изображенная на рисунке 2.9. Она состоит из короба, сделанного из тонкого непроводящего материала с размерами  $0,60 \times 0,60 \times 0,60$  м. Для повышения контрастности нижней границы исследуемого слоя предусмотрена возможность размещения отражающего материала (алюминиевая фольга, металлизированная ткань).

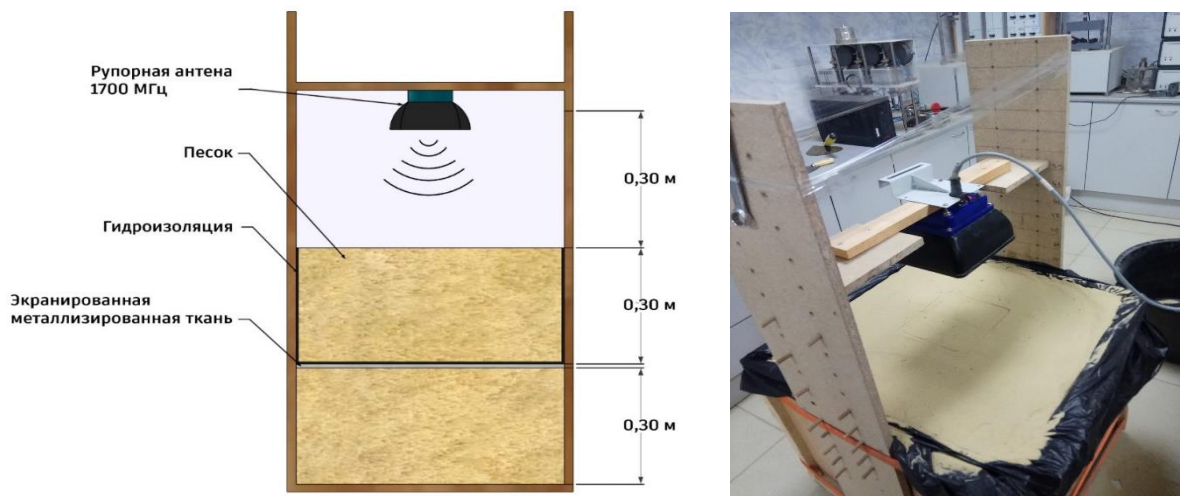


Рисунок 2.9 – Экспериментальная установка для георадиолокационных исследований свойств грунтового слоя

При расчетах амплитуды отраженной верхней границей песчаного слоя электромагнитной волны использовано выражение (2.6), в котором  $n$  обозначает показатель преломления песка.

Определение численного значения показателя преломления песка в естественно сухом состоянии выполнено его вариацией до совпадения результатов расчета и эксперимента. Оптимизированные значения показателя преломления песка, определенные при использовании антенных блоков № 277, № 278 и № 158, размещаемых на разной высоте над отражающей поверхностью, приведены в таблице 2.2. Усреднение приведенных в таблице 2.2 значений позволило определить среднее значение и величину погрешности показателя преломления песка:  $n = 1,7 \pm 0,1$ . На рисунке 2.10 сопоставлены результаты экспериментальных исследований амплитуды отраженной волны и результаты соответствующих расчетов, выполненных при оптимизированных значениях параметров.

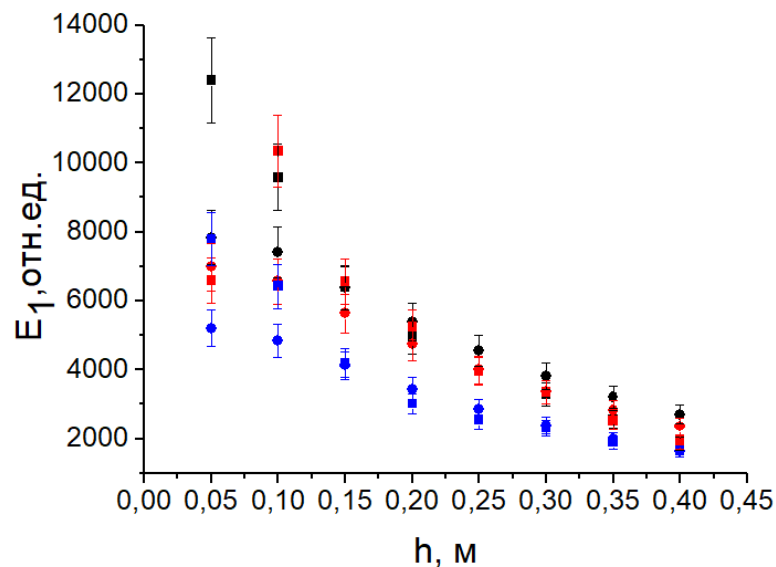


Рисунок 2.10 – Результаты измерений амплитуды волны, отраженной верхней границей песчаного слоя, полученные с использованием антенных блоков № 277 (■ – эксперимент, ● – теория), № 278 (■ – эксперимент, ● – теория) и № 158 (■ – эксперимент, ● – теория). Вертикальными отрезками показаны погрешности в 10 %

Для расчета амплитуды электромагнитной волны, отраженной от нижней границы слоя, с использованием выражения (2.7) необходимо определить коэффициент затухания электромагнитного излучения в песке. Для этого выполнено экспериментальное измерение амплитуд электромагнитных волн, отраженных от нижних границ двух слоев толщиной соответственно 0,30 и 0,58 м, под которыми располагалась воздушная прослойка. При измерениях использовался антенный блок № 277. Результаты измерений приведены на рисунке 2.11.

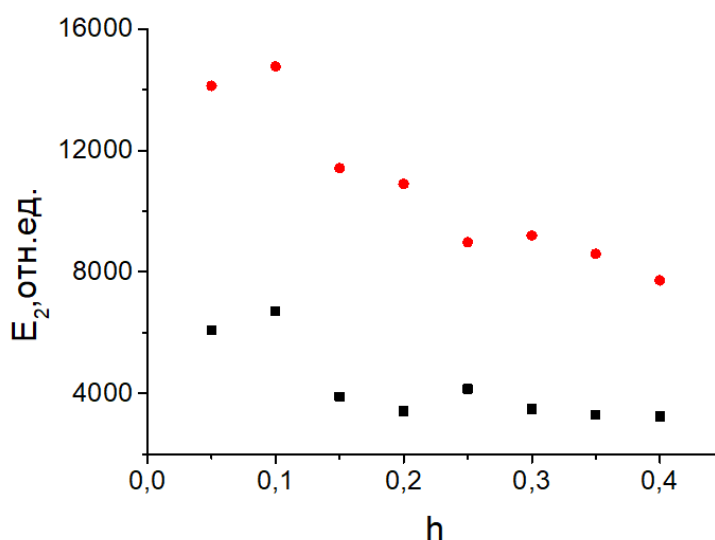


Рисунок 2.11 – Амплитуда электромагнитной волны, отраженной нижней поверхностью песчаного слоя толщиной 0,58 м (■) и 0,3 м (●) в зависимости от высоты размещения антенного блока № 277 над верхней поверхностью

Использование для расчетов данных, приведенных на рисунке 2.11, позволило определить коэффициент затухания электромагнитного излучения в песке (2.8) в естественно-сухом состоянии, который оказался равным  $p_1 = 1,21 \text{ м}^{-1}$ .

На рисунке 2.12 выполнено сопоставление результатов расчетов и измерений амплитуды волны, зарегистрированной приемными антеннами № 277 и № 278 после отражения от нижней границы слоя толщиной 0,3 м. На этом же рисунке приведены результаты, полученные для песчаного слоя толщиной 0,58 м с использованием антенны № 277.

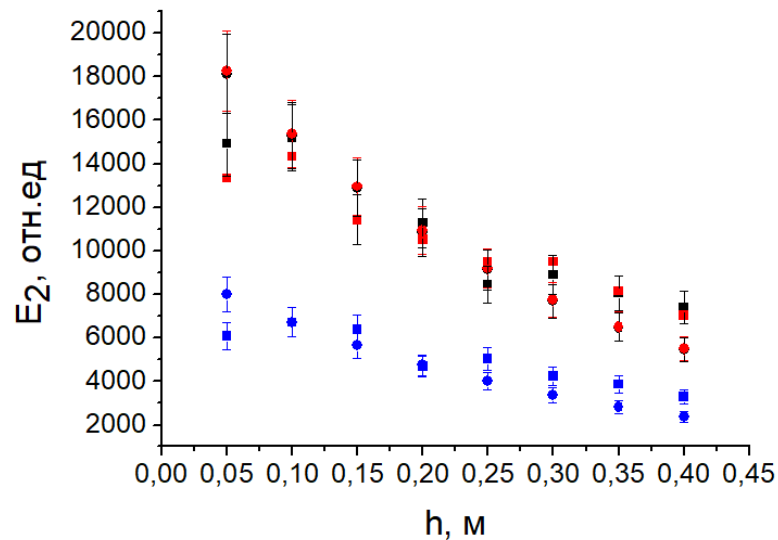


Рисунок 2.12 – Амплитуда электромагнитной волны, отраженной нижней границей песчаного слоя толщиной 0,3 м: результаты получены с использованием антенных блоков № 277 (■ – эксперимент, ● – теория), № 278 (■ – эксперимент, ● – теория). Амплитуда электромагнитной волны, отраженной нижней границей песчаного слоя толщиной 0,58 м, получена с использованием антенного блока № 277 (■ – эксперимент, ● – теория). Вертикальными отрезками показаны погрешности в 10 %. По горизонтальной оси отложены высоты размещения антенного блока над верхней границей песчаного слоя

*Песок в увлажненном состоянии.* При обследовании песчаного слоя разной влажности приемная антенна находилась на высоте 0,30 м и сигнал, отраженный от верхней поверхности песка, надежно выделяется на фоне сигнала прямого прохождения в георадиолокационных трассах.

В процессе дренирования воды выполнялись измерения влажности слоя песка согласно ГОСТ 5180–2015 в нескольких точках до глубины 0,3 м. На рисунке 2.13 приведены результаты измерения показателя преломления в зависимости от средней влажности по глубине песчаного слоя. Результаты получены с использованием антенных блоков № 277 и № 278. Полученные показатели преломления усреднены и линейно аппроксимированы. Вообще говоря, для аппроксимации зависимости диэлектрической проницаемости от влажности в литературе принято использовать полиномы более высокой степени. С этой целью

в работе [69] используются полиномы третьей степени, что соответствует выбору полинома степени 1,5 для аппроксимации показателя преломления. Вместе с этим, вклад слагаемых со степенью 1,5 в случае песка достаточно мал, что объясняет хорошее качество линейной аппроксимации (расхождение 5 %, рисунок 2.13). Для оценки точности измерения на этом же рисунке приведены результаты измерения, выполненные резонансным методом [89; 61].

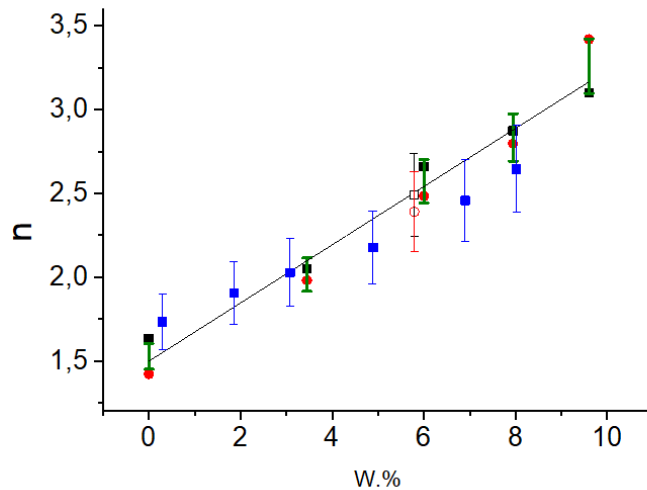


Рисунок 2.13 – Зависимость показателя преломления песка от влажности.

Результаты получены с использованием антенн № 277 (■) и № 278 (●).

Аппроксимирующая прямая проведена по средним значениям данных, полученных от антенн № 277 и № 278. Вертикальными толстыми отрезками изображены погрешности средних значений величиной 5 %. Результаты, полученные резонансным (■) и георадиолокационным методами (□ – антенна № 277; ○ – антенна № 278) приведены с погрешностью 10 %

(вертикальные тонкие отрезки)

## 2.4 Выводы

Устранены недостатки и ограничения резонансного метода определения диэлектрической проницаемости и влажности грунтов путем расширения верифицированного диапазона измеряемых показателей, используемых при тарировке оборудования и построении корреляционной зависимости. Таким образом, удалось сдвинуть предел верификации определяемых значений



диэлектрической проницаемости с  $\epsilon = 6$  до  $\epsilon = 30$ . Определение точности этой процедуры выполнено сравнением данных, полученных резонансным методом, с данными, полученными радиоволновым методом с применением прибора Keysight N9918A, погрешность определения величины диэлектрической проницаемости не превышает 10 %.

Отмеченное выше ограничение диапазона измеряемых значений диэлектрической проницаемости ( $\epsilon < 30$ ) преодолено за счет применения технологии, базирующейся на методе ИК-спектроскопии. В данном исследовании представлена версия метода [74], доработанная для учета распределения молекул воды на частицах глинистых минералов. Этот метод расширяет спектр применения резонансного метода [61, 79] до значений влажностей близких к границе текучести.

Метод георадиолокации в данном исследовании развит тарированием георадиолокационной аппаратуры. Технология тарирования позволяет использовать метод георадиолокации для получения количественных результатов. В настоящем исследовании доработанный метод использован для изучения отражения электромагнитного излучения от верхней и нижней поверхностей грунтового слоя, что позволяет определять показатель преломления и влажность грунтового слоя с использованием заранее заготовленной корреляционной зависимости. Данный подход разработан для контроля качества увлажнения протяженных участков конструктивных слоев.

### **3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА**

В данном разделе приводятся разработанные методики и примеры их применения для решения практических задач оценки свойств грунтов земляного полотна. Разработаны методики, позволяющие оперативно определить состав грунта земляного полотна, грунтов, поставляемых для ведения ремонтных и строительных работ, а также наличие и концентрацию модификаторов свойств грунта.

#### **3.1 Изменение состава грунтов из одного карьера**

В настоящее время строительство железных дорог ведется интенсивными темпами в различных инженерно-геологических условиях по всему миру. Чтобы сэкономить деньги и сократить время строительства, при устройстве основания используется местное сырье. В этой ситуации достижение показателей качества строительства зависит от соответствия характеристик грунтовых материалов, источники которых простираются вдоль строящихся дорог на тысячи километров, требованиям проектов. Наличие проблемы соответствия характеристик грунтовых материалов требованиям проектов иллюстрируется рисунком 3.1, на котором показаны результаты уплотнения по ГОСТ 22733–2016 [95] некоторых глин и суглинков, использованных в строительстве участка железной дороги в обход города Краснодара в 2017–2018 гг. Из рисунка 3.1 видно, что разброс в оптимальных значениях влажности может составлять 40 %, тогда как разброс значений плотности, достигаемых при оптимальных значениях влажности, может достигать 20 %.

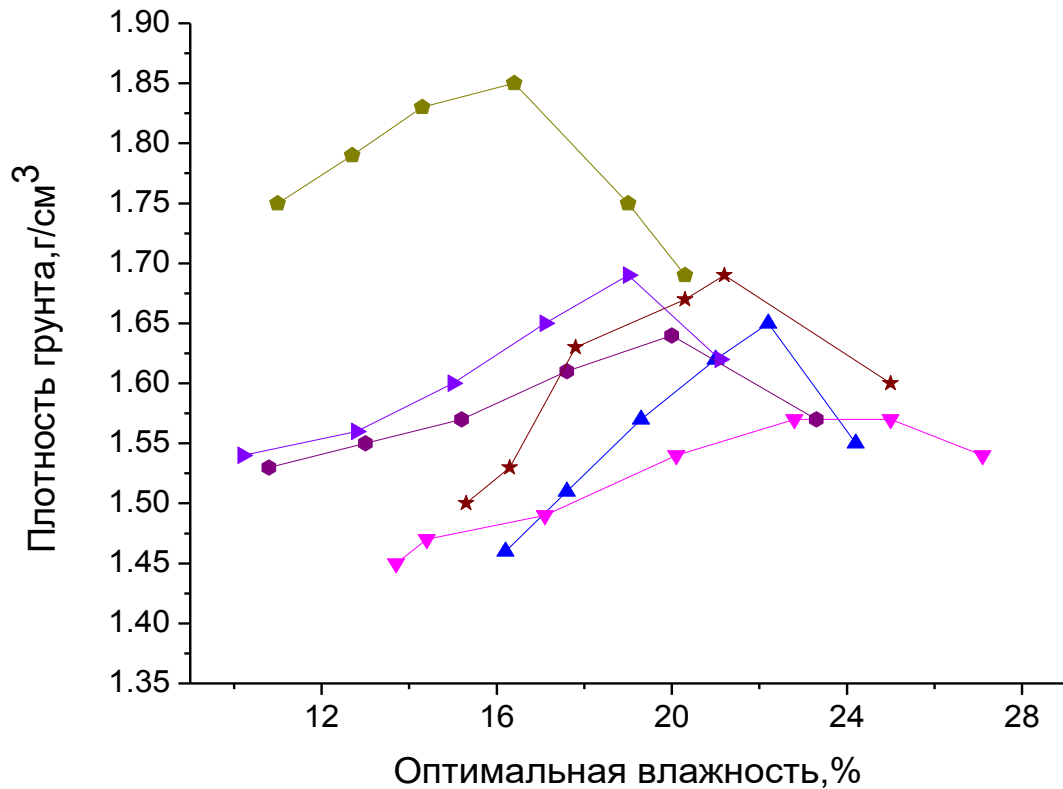


Рисунок 3.1 – Графики определения максимальной плотности и оптимальной влажности некоторых грунтов, использованных при строительстве железнодорожного пути в обход г. Краснодара

Другая проблема использования глинистых грунтов связана с возможностью их набухания [96–98]. В результате увеличения объема таких грунтов (например, после интенсивных дождей) [99] земляное полотно деформируется, вызывая тем самым нарушения геометрии верхнего строения пути [100–102]. Согласно данным работы [103], использование при строительстве набухающих глин приводит к большим материальным затратам, оцениваемым в США величиной, превышающей 9 млрд долл. в год. Согласно данным, приведенным в работе [104], набухающие грунты ежегодно наносят инфраструктуре ущерб, в два раза превышающий совокупный ущерб от наводнений, ураганов, торнадо и землетрясений. Эта проблема актуальна при эксплуатации земляного полотна дорог во многих частях земного шара [105].

Механизм изменения объема глинистых грунтов при увеличении влажности достаточно хорошо изучен. Анализ результатов соответствующих измерений позволяет отметить увеличение набухания глинистых грунтов при увеличении содержания монтмориллонита и выявить взаимосвязь между индексом пластичности и удельной площадью поверхности глинистых частиц [106]. В работе [107] показано, что набухание монтмориллонита непосредственно связано с распадом крупных частиц на более мелкие наноразмерные и мезомасштабные частицы с повышенным включением воды в прослойки.

Исследования, выполненные в работе [108], показали, что грунты могут продолжать набухать даже после достижения полностью водонасыщенного состояния из-за продолжающегося процесса гидратации монтмориллонита.

Таким образом, при строительстве дорожного полотна железных и автомобильных дорог необходимо контролировать соответствие свойств местных почв требованиям проектов.

Наиболее полное решение этой задачи может базироваться на определении минерального состава и влажности грунта с последующим уточнением их соответствия грунту, использованному при выработке проектных решений. Однако в практике строительства такая постановка задачи нереализуема, поскольку требует проведения достаточно сложных и продолжительных лабораторных экспериментов.

Поскольку использование методов входного контроля свойств почвы может увеличить время строительства, методы испытаний должны быть недорогими с точки зрения продолжительности измерений.

Свойства почв, регулируемые проектами, в том числе набухание, определяются их минеральным и фазовым составом. Среди осадочных пород глины являются наиболее сложными объектами для количественного минерального анализа. Согласно [109] при решении задачи количественного анализа глин основным инструментом остается рентгеноструктурный метод, дополненный инфракрасной спектроскопией, химическим анализом и электронной микроскопией.

В [110] представлена информация о количественных методах, успешно примененных к искусственным смесям, представленным для идентификации во время третьего конкурса на Кубок Рейнольдса Общества глинистых минералов (RC). Три лучших результата были получены с помощью дифракции рентгеновских лучей (XRD) с использованием модифицированного однострочного эталонного отношения интенсивности (RIR) с внутренним стандартом и без него, а также с помощью метода Ритвельда. Достигнутая точность составила 11,3–15,3 %.

В [111] было отмечено, что применение методов RIR и Ритвельда дает примерно одинаковые результаты с точностью 3 мас.% при уровне достоверности 95 %, однако степень получаемой точности в значительной степени зависит от устранения предпочтительной ориентации минералов в образце. Поскольку экспериментальные методы XRD требуют использования дорогостоящего измерительного оборудования, а последующая обработка результатов измерений отнимает много времени, в этом исследовании для ускорения определения разработан экспресс-метод, основанный на использовании технологий ИК-спектроскопии, не требующий дорогостоящего аналитического оборудования.

Возможность использования инфракрасной спектроскопии для количественного анализа основана на том, что интенсивность полос зависит от концентрации соответствующих минералов в смесях. Применение инфракрасной спектроскопии к задаче количественного анализа сталкивается с рядом трудностей, обусловленных близостью спектрального положения основных полос многих почвообразующих минералов [112], наличием в образцах смешанных слоев минералов [113], и различными коэффициентами экстинкции минералов [114]. Ключевые проблемы, возникающие при количественном анализе методом ИК-спектроскопии, рассмотрены в [115]. К ним относятся необходимость предварительного определения качественного минерального состава образца, наличие подходящих эталонных спектров минералов и влияние размера частиц, что особенно важно при исследовании кварца. Разработка методов обработки результатов экспериментальных измерений [113] позволяет значительно повысить их точность: например, дифференцировать мусковит от иллита и

идентифицировать смешанные структуры «иллит – смектит». Однако, при всей точности методов количественного анализа глинистых минералов с помощью ИК-спектроскопии, они тем не менее остаются трудоемкими и не позволяют полностью решить проблему оперативного контроля свойств локальных почв. Кроме того, в [110] было отмечено, что успешное количественное определение больше зависит от опыта аналитика, чем от аналитической техники или используемого программного обеспечения; это является существенным ограничением в использовании этих технологий при выполнении строительных работ.

Таким образом, задача достижения требуемого качества строительства отчасти переносится на входной контроль материалов, позволяющий выяснить их соответствие требованиям проекта.

Поскольку применение технологий входного контроля может влиять на сроки строительства, методы входного контроля свойств грунтовых материалов должны быть точными, надежными и малозатратными в отношении сроков выполнения измерений. Для ускорения процедур входного контроля свойств грунтов в данной главе будет проведена разработка метода контроля изменения минерального состава местных почв вдоль линии строительства дорожного полотна автомобильных дорог и железных дорог. Для этой цели мы используем метод инфракрасной аттенуированной спектроскопии полного отражения (IR-ATR), который успешно применялся ранее для решения задачи качественного и количественного анализа сланцевых пород [112], и специально разработанное программное обеспечение для обработки результатов экспериментов, использование которого не требует большого аналитического опыта.

Исследование инфракрасных спектров выполнено методом, изложенным в п. 2.2.1. При обработке результатов использован метод полуколичественного анализа, изложенный в п. 2.2.2.

### ***3.1.1 Оценка точности алгоритма***

Оценка точности алгоритма выполнена на комбинациях минералов На-монтмориллонита (SWy-2), палыгорскита (PF1-1) и каолинита (kGa-1), спектры

которых приведены на рисунке 3.2. Видно, что спектр формируется из двух интенсивных полос в диапазоне волновых чисел  $500\text{--}625\text{ см}^{-1}$  и  $850\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ , каждая из которых имеет тонкую структуру. Наблюдаются также менее интенсивные полосы в диапазонах  $625\text{--}850\text{ см}^{-1}$ , а также  $1500\text{--}1750\text{ см}^{-1}$  и свыше  $3000\text{ см}^{-1}$ .

Анализ экспериментальных и теоретических данных грунтообразующих минералов, выполненный в [116–118], показывает, что появление полос поглощения в области  $850\text{--}1100\text{ см}^{-1}$  обусловлено валентными колебаниями атомов группы Si-O и деформационными колебаниями атомов группы O-H на их гидроксильной поверхности. Деформационные колебания OH-групп алюмоокислородных октаэдров каолинита проявляются в области  $900\text{--}960\text{ см}^{-1}$ . Две полосы в диапазонах  $1500\text{--}1750\text{ см}^{-1}$  и свыше  $3000\text{ см}^{-1}$ , согласно [119], связаны с наличием незначительного количества молекул воды в исследованных минералах, находящихся в воздушно-сухом состоянии.

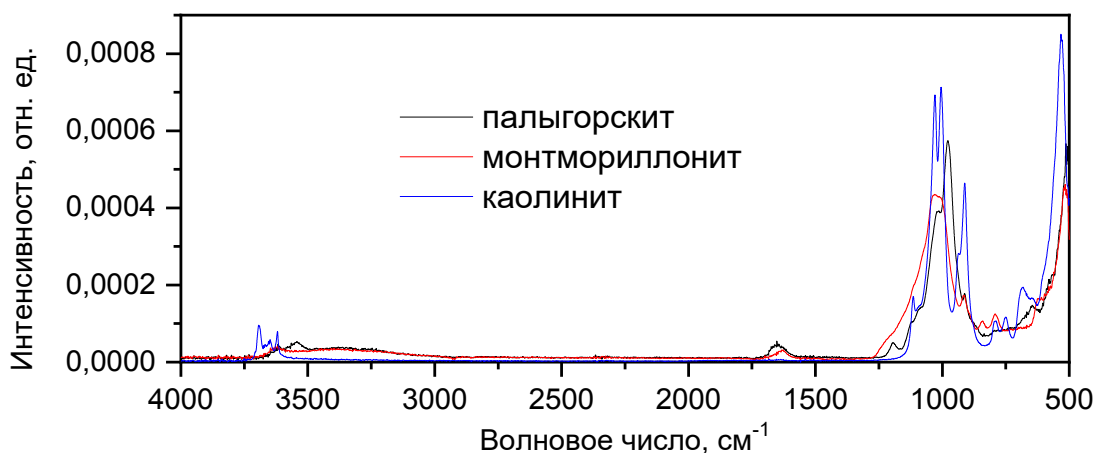


Рисунок 3.2 – ИК-спектры палыгорскита (PF1-1) (—), Na-монтмориллонита (SWy-2) (—) и каолинита (kGa-1) (—) в воздушно-сухом состоянии

Исследованные минералы были использованы для составления четырех образцов полиминеральных композиций. Заданные концентрации минералов в тестовых образцах ( $A_{i,j}$   $i$  – номер минерала,  $j$  – номер образца) приведены в таблице 3.1. В этой же таблице приведены результаты расчета концентраций ( $\alpha_{i,j}$ ) по (2.2).

Таблица 3.1 – Минеральный состав тестовых композиций

Вид данных	Минерал	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Состав образца, $A_{i,j}$	Палыгорскит (PF1-1)	0,333	0,5	0,5	0
	Na-монтмориллонит (SWy-2)	0,333	0	0,5	0,5
	Каолинит (kGa-1)	0,333	0,5	0	0,5
Результаты расчета, $\alpha_{i,j}$	Палыгорскит (PF1-1)	0,348	0,636	0,531	0,141
	Na-монтмориллонит (SWy-2)	0,335	-0,075	0,49	0,428
	Каолинит (kGa-1)	0,315	0,440	-0,028	0,430

Сравним результаты расчета  $\alpha_{i,j}$  с точными значениями концентраций минералов. Для этого определим отклонения результатов расчета от точного значения:

$$\sigma_{i,j} = \alpha_{i,j} - A_{i,j}, \quad (3.1)$$

а также среднее отклонение для всех полиминеральных образцов:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i,j} \sigma_{i,j}^2 / (n \cdot N)}, \quad (3.2)$$

где  $N$  – количество образцов;  $n$  – количество минералов в образце.

Полученное значение  $\Delta = 0,02$  можно считать усредненной оценкой точности используемого алгоритма расчета концентраций компонентов валового образца. Точность расчетов при использовании выражения (2.2) может существенно зависеть от выбора набора базисных спектров  $\{\varphi_i\}$ .

В реальных случаях точный состав анализируемого грунта точно не известен, и в базисный набор спектров  $\{\varphi_i\}$  приходится включать спектры всех минералов, наиболее характерных для грунтов данной местности. При этом базисный набор может оказаться излишне широким. Алгоритм в разделе 2.3, несмотря на это, дает реалистичные результаты. Проиллюстрируем это на примере решения задачи для образца 1 (см. таблицу 3.1), расширив базис за счет спектров минералов и



соединений, не использованных при его создании (таблица 3.2). Включим в набор базисных минералов, наряду с другими минералами, Са-монтмориллонит (Sca-3) и нонтронит (Nau-1). Спектры этих минералов близки по форме, что проиллюстрировано рисунком 3.3.

Таблица 3.2 – Истинный состав образца 1 и рассчитанные концентрации составляющих его минералов при использовании расширенного набора базисных спектров

Минералы	Доля минералов в образце 1	Рассчитанная доля минералов в образце 1 (см. таблицу 3.1)
Палыгорскит (PF1-1)	0,333	0,376
Na-монтмориллонит (SWy-2)	0,333	0,315
Каолинит (kGa-1)	0,333	0,384
Диарит	0	–0001
H <sub>2</sub> O	0	–0,050
Гранит	0	0,032
Сепиалит (SepSP-1)	0	–0,036
Са-монтмориллонит (Sca-3)	0	0,484
Нонтронит (Nau-1)	0	–0,493

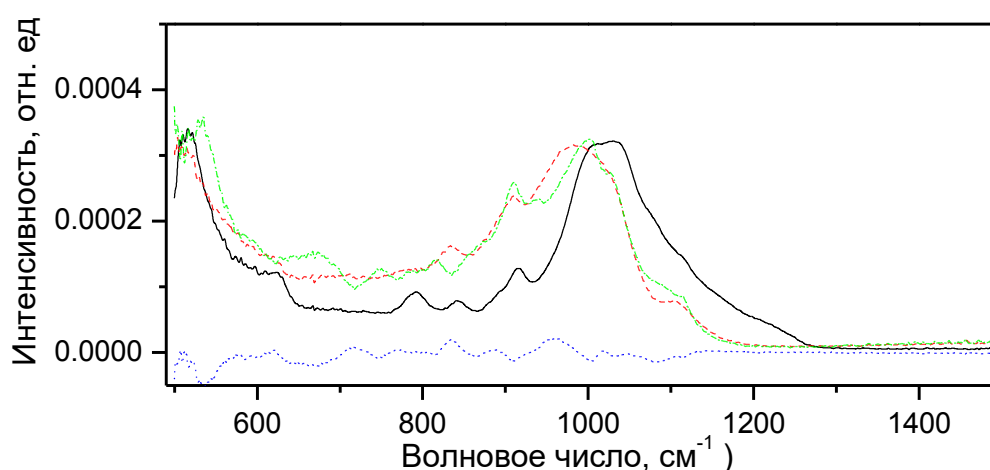


Рисунок 3.3 – Фрагмент ИК-спектра натриевого монтмориллонитов (SWy-2) (сплошная линия), кальциевого монтмориллонита (Sca-3) (пунктирная линия), нонтронита (Nau-1) (штрихпунктирная линия), сумма спектров кальциевого монтмориллонита (Sca-3) и нонтронита (Nau-1) с учетом коэффициентов

из таблицы 3.2 (точка)

Результаты расчета состава образца 1 приведены в таблице 3.2. Оказалось, что парциальный вклад в спектр образца 1 спектров диарита, воды, гранита и сепиалита (SepSP-1) не превышает 0,05. В то же время парциальные вклады кальциевого монтмориллонита (Sca-3) и нонтронита (Nau-1) близки к 0,5 и противоположны по знаку. Их суммарный вклад в синтезированный спектр 1 приведен на рисунке 3.3. Из данных, приведенных в таблице 3.2 и на рисунке 3.3, следует, что минералы, отсутствующие в исследуемом образце и имеющие спектры близкой формы, в разложение (2.2) входят с коэффициентами близкими по модулю и с противоположными знаками. В результате их общий вклад в решение (2.2) становится незначительным. При этом точность численных расчетов несколько ухудшается: в рассмотренном примере до  $\Delta = 0,08$ .

Трудности могут возникнуть, когда формы двух базисных спектров  $\varphi_k$  и  $\varphi_m$  очень близки, и при этом оба минерала входят в состав анализируемого грунта. В этом случае невозможно отдельно определить концентрацию каждого минерала, а лишь их сумму,  $\alpha_k + \alpha_m$ .

### **3.1.2 Базисный набор**

Известно, что осадочные породы редко бывают представлены одним грунтообразующим минералом. Исследования, проведенные в работах [120, 121], показывают, что чаще всего они представляют собой природные ассоциации, включающие несколько фиксированных типов глинистых минералов, а также и смешаннослойных алюмосиликатных минеральных образований, характеризующихся чередованием пакетов различных типов [121].

Естественным подходом к выбору минералов, спектры которых желательно включить в базисный набор для обеспечения его полноты при составлении уравнения (2.2), является экспериментальное определение наиболее значимых компонентов минерального состава строительных материалов в карьерах вдоль линии строительства земляного полотна дорог. К сожалению, такой подход требует выполнения большого количества наукоемких исследований и сложно реализуем

ввиду возможного непостоянства состава глинистых частиц даже в пределах одного карьера.

В связи с этим будем включать в базис спектры соединений, интенсивные полосы которых лежат в диапазонах волновых чисел, близких к диапазонам волновых чисел интенсивных полос спектра валового образца.

В данном исследовании в базисный набор  $\{\varphi_i\}$ , использованный при решении задачи (2.2), включен спектр иллита (IMt-2), минерала из группы гидрослюдоструктурного типа, кальциевого (Sca-3) и натриевого (SWy-2) монтмориллонитов, богатого железом нонтронита (Nau-1), представителей смектитной группы, а также каолинита (kGa-1), минерала из группы водных силикатов алюминия, которые относятся к наиболее распространенным грунтообразующим минералам на территории России. В качестве промежуточного минерала между ленточными и слоистыми силикатами в базис включен спектр палыгорскита (PF1-1).

Грунты естественных источников, применяемые при строительстве земляного полотна, могут относиться к глинам и суглинкам, которые отличаются количеством песка различного минерального состава. Мономинеральные пески могут содержать частицы кварца, слюды, полевого шпата. Часто встречаются залежи полиминеральных песков. В данном исследовании использованы спектры мелкого речного песка с высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  и диорита (Греческое месторождение, Курцовский карьер, Крым), используемого в качестве песка при строительстве. Кроме этого, в базисном наборе учтен спектр гранита (Блокгаузское месторождение, Адыгея), в результате выветривания которого образуется аркозовый песчаник, состоящий из мельчайших обломков кварца, почти неизмененного калиевого полевого шпата, отчасти слюд и плагиоклаз, имеющих пороодообразующее значение.

Дополнительно в базисе учтены спектры сепиолита (SepSP-1), формирующегося в глинисто-карбонатных породах, спектры известняков, полученных из мрамора (Полоцкое месторождение) и мела (Лебединское месторождение).

Технология строительства земляного полотна включает очистку грунтовых пластов от почвы, но не гарантирует ее полное отсутствие в сырье. В связи с этим в базис (2.2) включен спектр органических соединений, формирующих торф.

Поскольку технологии извлечения, транспортировки строительных материалов и строительства земляного полотна приводят к изменению влажности грунтов, в базисный набор включен спектр воды.

Спектры минералов, включенные в базисный набор, приведены на рисунке 3.4.

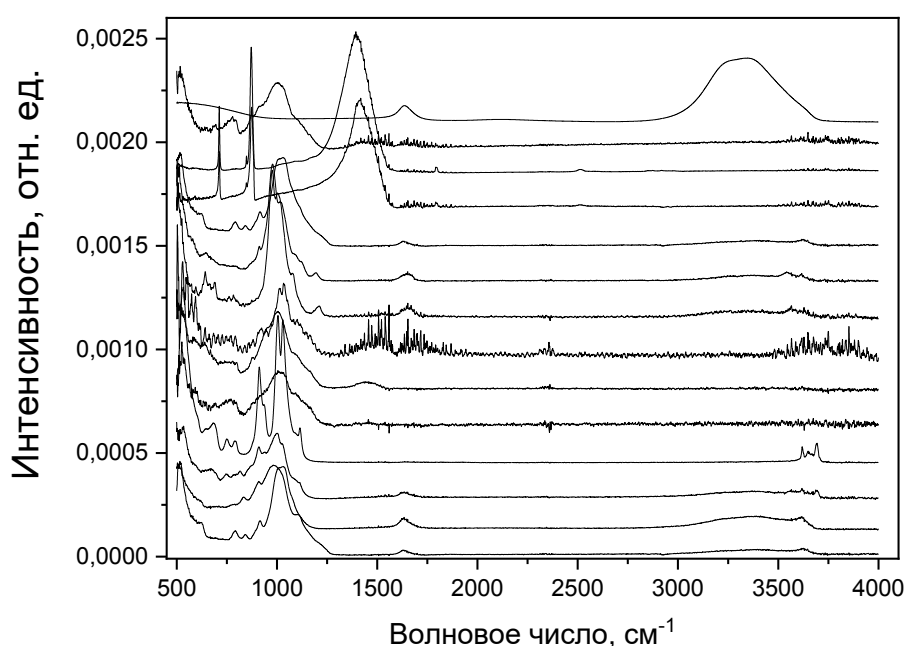


Рисунок 3.4 – ИК-спектры снизу вверх натриевого монтмориллонита (SWy-2), кальциевого монтмориллонита (Sca-3), нонтронита (Nau-1), каолинита (kGa-1), SiO<sub>2</sub>, диорита, гранита, сепиолита (SepSP-1), палыгорскита (PF1-1), иллита (IMt-2), мрамора, мела, торфа, H<sub>2</sub>O

### **3.1.3 Исследованные перегоны**

В качестве объектов исследования рассмотрены связные грунты притрассовых карьеров, расположенных на пикете 279–281 перегона Себедахово – Протока и пикете 5736–5746 перегона Бурсак – Выселки. Эти карьеры использованы при комплексной реконструкции железнодорожного пути на участке

Котельниково – Тихорецкая – Кореновск – Крымская с обходом Краснодарского узла Северо-Кавказской железной дороги.

Третьим объектом исследования стали глинистые грунты на пикете 634+00, которые планировались к использованию при строительстве подхода к Керченскому мосту.

На рисунке 3.5 приведены фрагменты спектров образцов глинистых грунтов перегона Себедахово – Протока и Бурсак – Выселки. Из рисунка видно, что даже при небольшой протяженности карьера на перегоне Себедахово – Протока, длина которого составляет 200 м, фрагменты спектров заметно отличаются. Основные отличия фиксируются для волновых чисел  $500\text{ см}^{-1}$  и  $1000\text{ см}^{-1}$ , что может быть связано с изменением минерального состава грунтов.

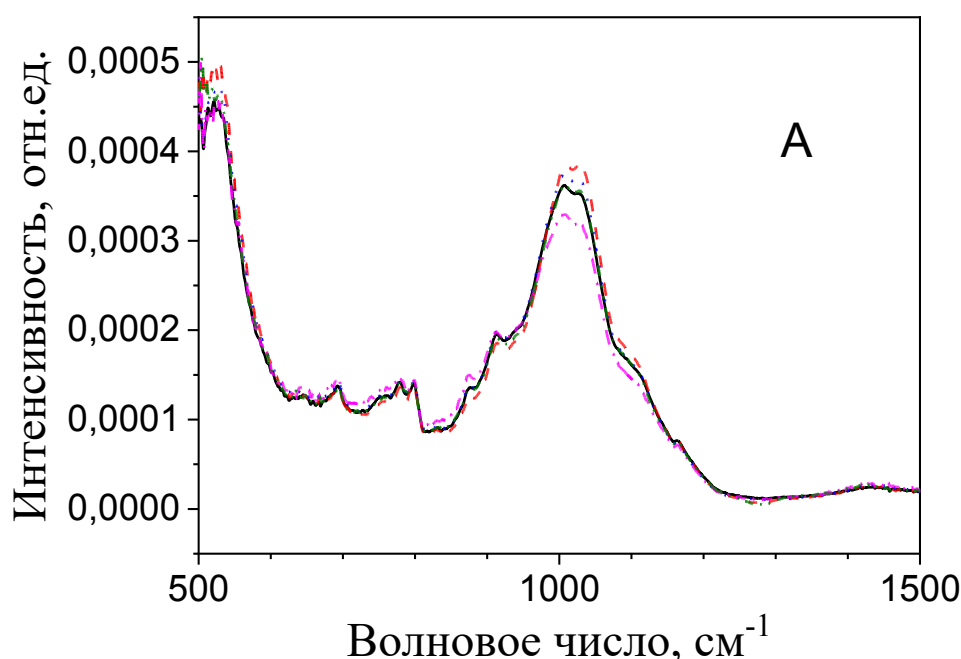


Рисунок 3.5 (начало) – Фрагменты ИК-спектров грунтов перегона Себедахово – Протока (А), Бурсак – Выселки (В). Образцы получены соответственно на пикетах

(рисунки А и В): 279+05, 155735+50 (———, сплошная линия); 279+95, 155737+50 (———, пунктирная линия); 280+25, 155740+50 (———, пунктирная линия); 280+50, 155743+50 (———, штрихпунктирная линия); 280+95, 155745+50 (———, штрихпунктирная линия с двумя точками)

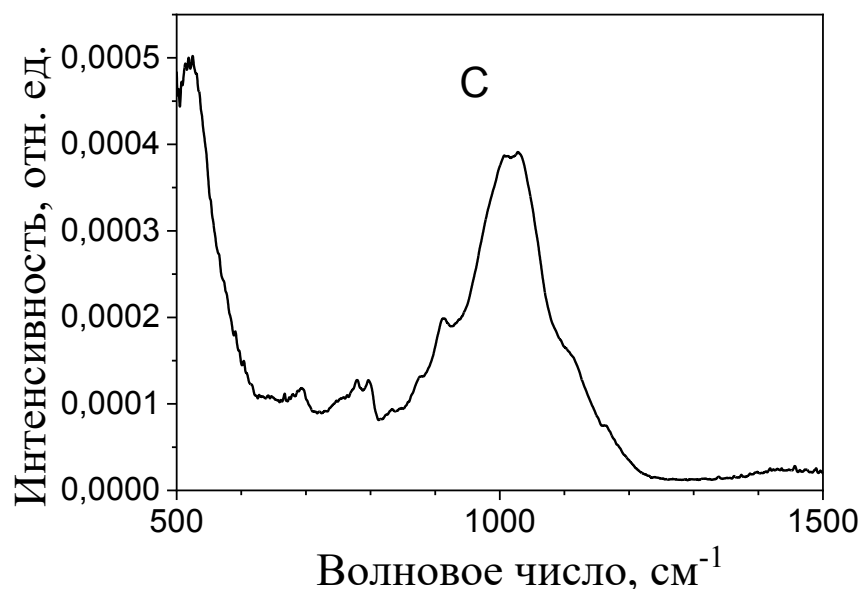
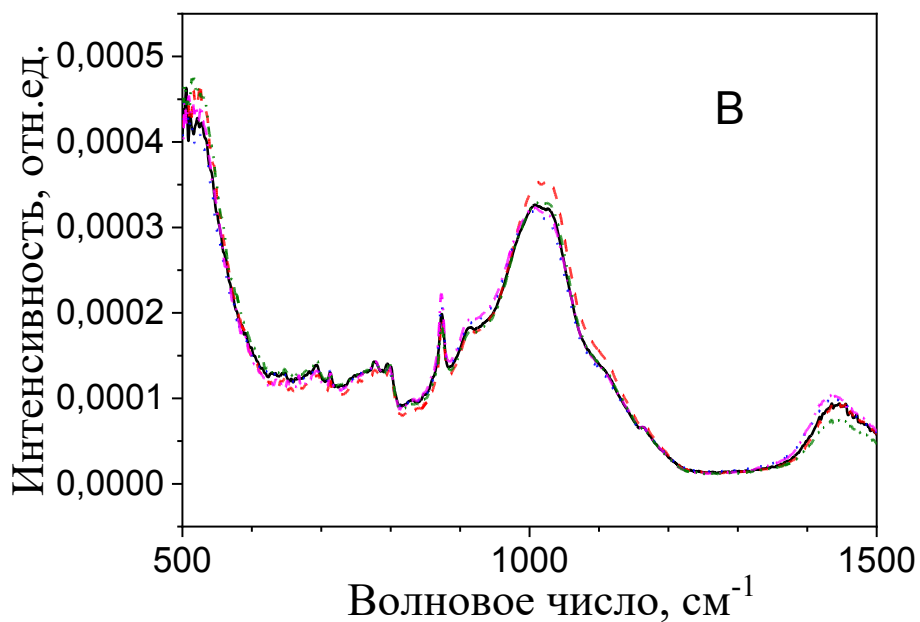


Рисунок 3.5 (продолжение) – Фрагменты ИК-спектров грунтов перегона Себедахово – Протока (А), Бурсак – Выселки (В) и подход к Керченскому мосту (С). Образцы получены соответственно на пикетах (рисунки А и В): 279+05, 155735+50 (——, сплошная линия); 279+95, 155737+50 (——, пунктирная линия); 280+25, 155740+50 (——, пунктирная линия); 280+50, 155743+50 (——, штрихпунктирная линия); 280+95, 155745+50 (——, штрихпунктирная линия с двумя точками) и (рисунок С) 634+00 (——, сплошная линия)

Основное отличие фрагментов спектров образцов перегона Бурсак – Выселки наблюдается для волновых чисел  $500\text{ см}^{-1}$ ,  $1000\text{ см}^{-1}$  и  $1400\text{ см}^{-1}$ , что может быть связано с изменением минерального состава грунтов и влажностью образцов, отобранных вдоль длины карьера, составляющей 1000 м.

После решения выражения (2.2) на базисном наборе функций, приведенных на рисунке 3.3, выполнено суммирование вкладов  $\alpha_i$  в четырех группах, интегрально представляющих состав глинистых грунтов и условно названных «глина» (иллит, каолинит, Na – монтмориллонит, Ca – монтмориллонит, нонтронит, палыгорскит), «мел» (мел, мрамор), «песок» (песок, гранит, диорит, сепиолит), «почва» (торф).

Результаты суммирования для участков Себедахово – Протока, Бурсак – Выселки приведены соответственно на рисунке 3.6, А и В, и для пикета 634+00 на подходе к Керченскому мосту – в таблице 3.4.

Результаты просуммированных вкладов для глины линейно аппроксимированы и приведены красной прямой линией на рисунке 3.6, А и В. Отклонения отдельных значений просуммированных вкладов от аппроксимирующей прямой определены численно и не превышают 10 %.

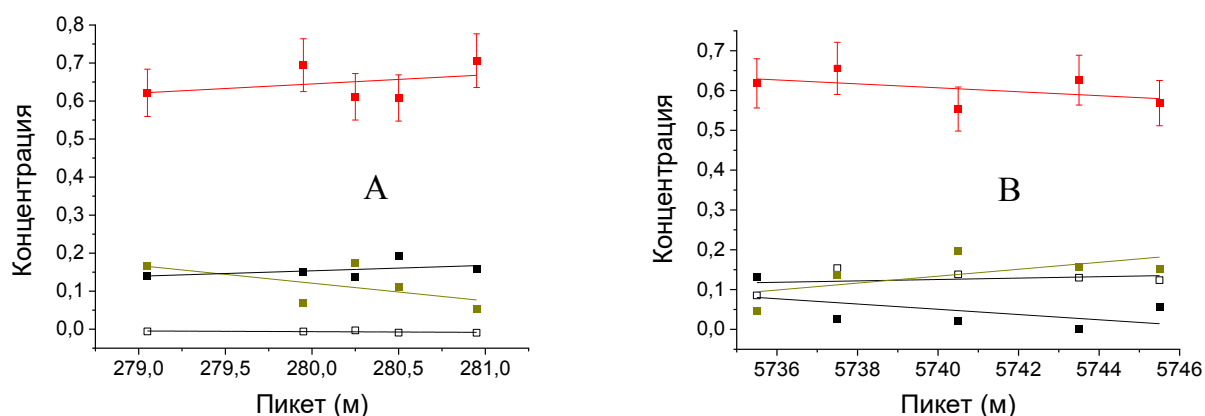


Рисунок 3.6 – Состав глинистых грунтов на участках строительства Себедахово – Протока (А) и Бурсак – Выселки (В). Используются обозначения: (■) – глина, (■) – почва, (■) – песок и (□) – мел. Приведены результаты линейной аппроксимации для глины (сплошная линия красного цвета) и погрешности отдельных результатов величиной 10 % (вертикальные отрезки)

Для сравнения полученных результатов между собой исследованы ИК-спектры смесей пяти образцов участков Себедахово – Протока и Бурсак – Выселки, которые также приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Минеральный состав глинистых образцов, определенный разложением спектров (2.2), усредненных по точкам отбора на участках строительства

Минералы и соединения	Себедахово – Протока	Бурсак – Выселки	Подход к Керченскому мосту, ПК 634+00
H <sub>2</sub> O	0.088	0,095	0,061
Мел	0,005	–0,117	0,011
Мрамор	–0,011	0,243	–0,007
Иллит	0,454	0,414	0,493
Каолинит	0,151	0,145	0,176
На-монтмориллонит	0,110	0,026	0,243
Са-монтмориллонит	–0,519	–0,511	–0,460
Нонтронит	0,137	0,169	–0,005
Палыгорскит	0,314	0,362	0,431
SiO <sub>2</sub>	0,125	0,080	0,108
Гранит	0,034	0,040	0,067
Диорит	0,041	0,126	–0,085
Сепиолит	–0,009	–0,107	–0,122
Торф	0,156	0,036	0,089
<b>Компоненты грунтов</b>			
Вода	0,089	0,095	0,061
Мел	–0,007	0,126	0,004
Глина	0,648	0,604	0,877
Песок	0,114	0,138	–0,032
Почва	0,156	0,036	0,089

Результаты расчетов, приведенные в таблице 3.4, представлены на рисунке 3.7 незаштрихованными столбцами.



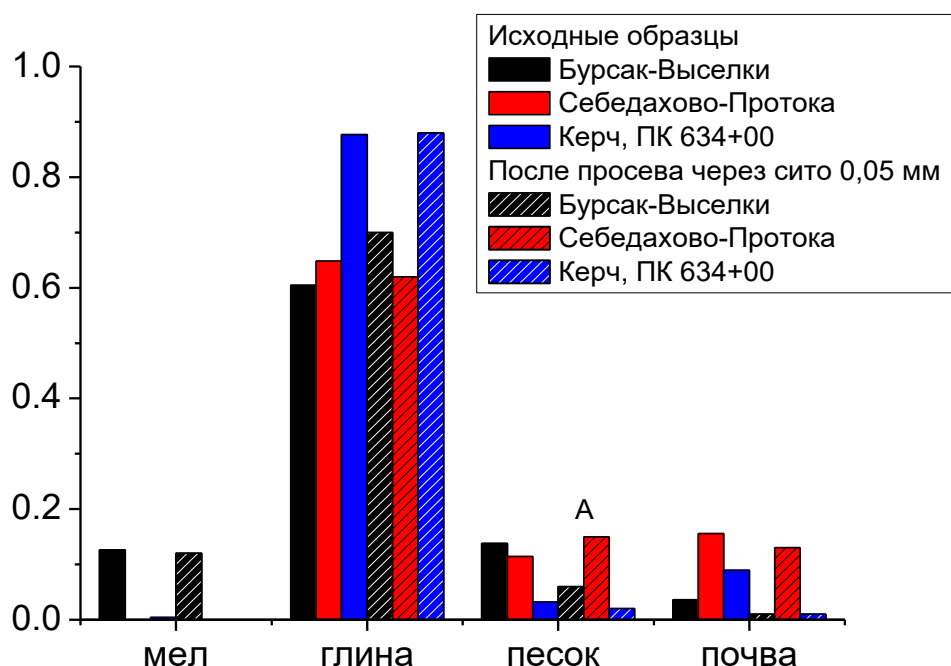


Рисунок 3.7 – Состав глинистых грунтов на участках строительства Себедахово – Протока (■), Бурсак – Выселки (■) и на подходе к Керченскому мосту (■).

Заштрихованные столбцы представляют результаты расчетов, полученные после рассева грунта на сите 0,05 мм

### 3.1.4 Анализ результатов исследований

Предложенная для достижения целей исследования численная процедура, описанная в разделе 2.2, имеет погрешность, оцененную величиной среднеквадратичного отклонения  $\Delta = 0,02$ . При выполнении оценки погрешности в данной работе использованы модельные спектры, построенные в виде линейной комбинации спектров грунтообразующих минералов с перекрывающимися полосами, как показано на рисунке 3.2. При решении практически значимых задач желательно формировать базисный набор из спектров минералов и химических соединений, реально формирующих исследуемый грунт. В случае, когда требуемая информация отсутствует, как, например, при выполнении данного исследования, базис можно формировать из спектров грунтообразующих минералов, типичных для региона строительства.

Отсутствие информации о составе исследуемых в данной работе грунтов, которую можно получать комплексом лабораторных методов, дополняющих метод рентгеноструктурного анализа [110], заставляет обратиться к проблеме достоверности полученных в исследовании данных. С этой целью согласно ГОСТ 12536–2014 [122] методом разделения грунта на фракции с промывкой водой (п. 3.2.3.2) выполнено определение гранулометрического состава исследуемых образцов грунтов с использованием сита 0,05 мм. Выбор размера ячеек обусловлен тем, что согласно ГОСТ 25100–2020 [123] такое сито разделяет пески от пылеватых и глинистых частиц. Согласно данным, приведенным в таблице 4.4, на этом сите могут оставаться частицы песка, мела и почвы, а также глины, удерживаемой водой на их поверхности. При рассеве использовались грунты, измельченные и подготовленные для спектральных измерений. В результате измельчения через сито могли пройти мелкие фракции песка, не растворимый в воде мел и органические соединения, формирующие грунт. В связи с этим в работе выполнены дополнительные эксперименты по просеву этих компонентов после помола. Использованы мелкий речной песок, мел Лебединского месторождения и торф. Оказалось, что на сите 0,05 остается 98 % песка, 6 % мела и 93 % торфа. Полученные значения использованы для уточнения результатов рассева, которые совместно с компонентами  $\alpha'_i$  решения задачи (2.2) для спектров остатков представлены в таблице 3.4, а также на рисунке 3.7 заштрихованными прямоугольниками.

Использованный алгоритм расчета концентрации минералов с учетом результатов рассева проиллюстрируем на примере результатов исследования грунтов на участке Себедахово – Протока. Согласно данным таблицы 3.4 рассев привел к тому, что 0,68 массы прошло сквозь сито. Эта масса формируется глинистыми и пылеватыми частицами, в меньшей мере мелом, песком, почвой и водой на их поверхности.

Таблица 3.4 – Остатки грунтов на сите 0,05 мм и их минеральный состав  $\alpha'_i$ ,  
определенный разложением спектров (2.2)

Минералы и соединения	Себедахово – Протока	Бурсак – Выселки	Подход к Керченскому мосту, ПК 634+00
Остаток на сите 0,05 мм	32 %	7 %	4 %
	$\alpha'_i$		
H <sub>2</sub> O	0,077	0,054	0,058
Мел	–0,064	–0,050	–0,020
Мрамор	0,059	0,134	0,024
Иллит	0,682	0,282	0,508
Каолинит	0,069	–0,0205	–0,019
Na-монтмориллонит	–0,276	0,099	0,043
Ca-монтмориллонит	–0,481	–0,302	–0,377
Нонтронит	0,047	0,302	0,165
Палыгорскит	0,058	0,075	0,035
SiO <sub>2</sub>	0,283	0,400	0,365
Гранит	0,149	0,023	0,039
Диорит	0,007	–0,026	–0,029
Сепиолит	0,019	–0,020	0,003
Торф	0,370	0,049	0,204
<b>Компоненты грунтов</b>			
Вода	0,077	0,054	0,058
Мел	0,000	0,084	0,004
Глина	0,100	0,437	0,356
Песок	0,458	0,377	0,378
Почва	0,370	0,040	0,204

Для определения концентрации глинистых и пылеватых частиц из 68 % пробы, прошедшей сквозь сито, удалим воду, мел (94 %), песок (2 %) и почву (7 %), в итоге получим:

$$\Delta m_1 = 0,68 \cdot (1,00 - \alpha_{H_2O} - 0,94 \cdot \alpha_{\text{мел}} - 0,02 \cdot \alpha_{\text{песок}} - 0,07 \cdot \alpha_{\text{почва}}) = 0,59.$$

Далее определим, сколько глинистых и пылеватых частиц осталось в 32 % пробы на сите:

$$\delta m_2 = 0,32 \cdot \alpha'_{\text{глина}} = 0,03. \quad (3.3)$$

В итоге доля глины в образце, полученном на участке Себедахово – Протока, оказалась равной:

$$\delta m_1 + \delta m_2 = 0,62. \quad (3.4)$$

Рассуждая аналогичным образом, можно получить концентрации мела (0,00), песка (0,15) и почвы (0,13).

Из сравнения данных, приведенных на рисунке 3.7, можно сделать вывод о том, что погрешность в определении концентрации глинистых частиц максимальна на участке Бурсак – Выселки и составляет 15 %. Погрешности в определении песка на этом участке и почвы на ПК 634+00 на подходе к Керченскому мосту превышают 50 %, однако концентрация этих компонентов невелика (порядка 0,01) и их влияние на свойства строительных материалов ограничено. Однако, наличие органических веществ в пробах строительных материалов может не допускаться проектами строительства железных дорог для высокоскоростного и перспективного грузового транспорта. В этом случае необходимо верифицировать результаты разрабатываемой технологии независимыми методами и вносить коррективы в технологические процессы разработки карьеров.

На рисунке 3.8 приведены спектры глинистых минералов (а) и песков (б) в естественно-сухом состоянии, содержащихся в образце на участке Себедахово – Протока и его остатка при просеивании на сите 0,05 мм. Они получены восстановлением по формуле (2.2) с использованием коэффициентов  $\alpha_i$  и  $\alpha'_i$  из таблиц 3.4 и 3.5. На рисунке видно, что спектры песчаных минералов образца и остатка его просева практически совпадают по относительной интенсивности и положению основных полос. Спектры глинистых образцов отличаются тонкой структурой и относительной интенсивностью основных полос поглощения. Кроме этого, в спектре глинистых грунтов остатка на сите полосы воды более интенсивные. Эти обстоятельства могут объясняться тем, что при промывании образца, размещенного на сите, сквозь него проходят преимущественно минералы с меньшим сродством к поверхности песка в водной среде. Это приводит к изменению процентного содержания глинистых минералов в остатке на сите и, как следствие, к росту сорбированной воды в естественно-сухом состоянии глинистых частиц.

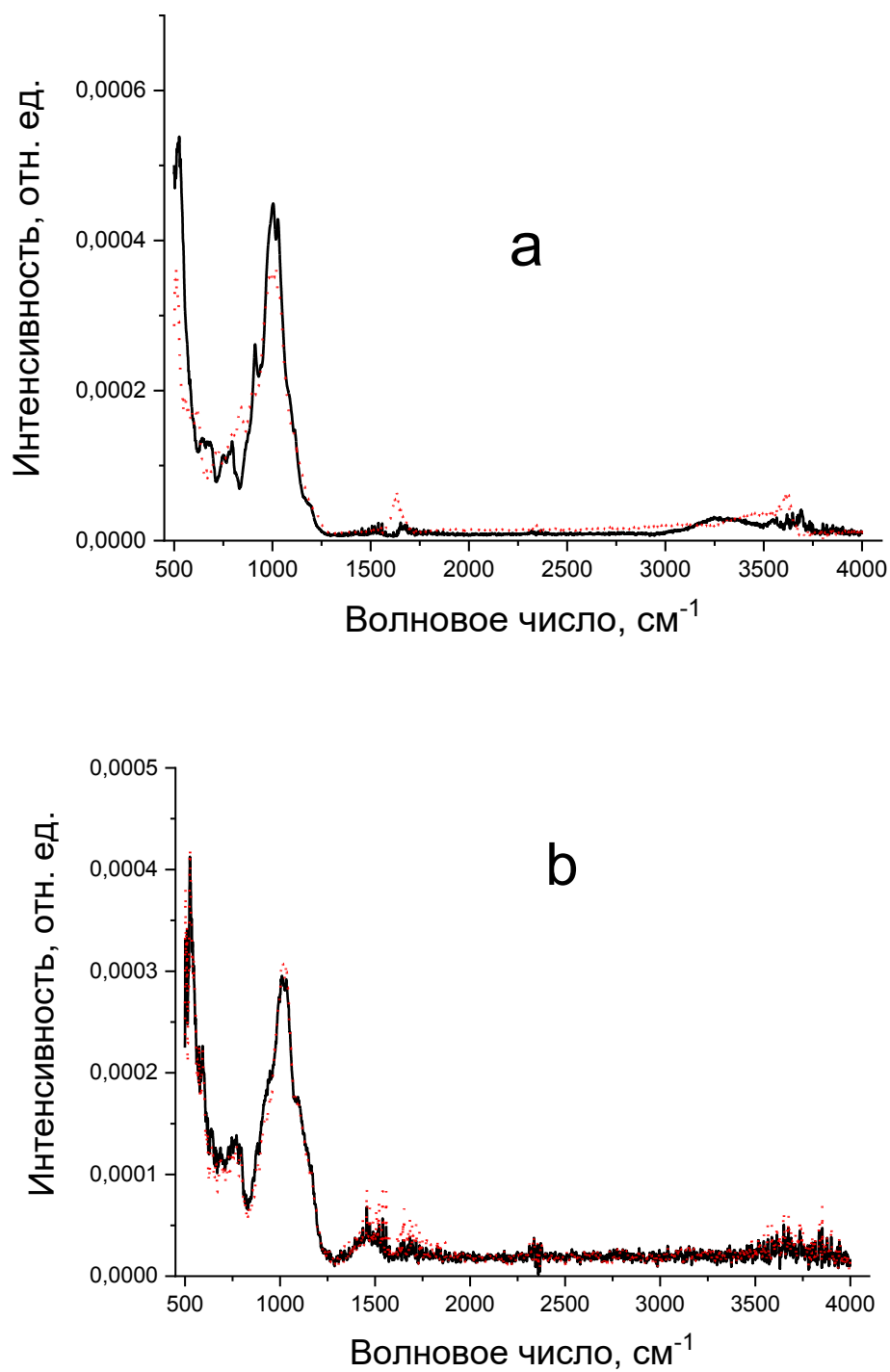


Рисунок 3.8 – Спектры глинистых минералов (а) и песков (б) в естественно-сухом состоянии образца с участка Себедахово – Протока (—, сплошная линия) и остатков его просева на сите 0,05 мм (-----, пунктирная линия)

### 3.2 Электрические свойства загипсованных минералов и грунтов

Изучение диэлектрической проницаемости геологических сред обусловлено широким применением электромагнитных полей для решения задач инженерной геофизики при обследовании земляного полотна железных дорог. Известно, что глубина исследований и разрешающая способность применяемых геофизических методов зависят от скорости распространения и затухания электромагнитного излучения в средах, которые определяются этой физической величиной. Обычно высокое затухание характерно для низкоомных глинистых грунтов и растет с увеличением их влажности [89, 131, 132, 141]. Однако известны случаи, когда проникновение электромагнитных волн в диапазоне, применяемом в методе георадиолокации (100 МГц – 2 ГГц), ограничено в засушливых и пустынных почвах, несмотря на их низкую влажность и умеренную проводимость. В работе [128] затухание электромагнитного излучения в таких грунтах связано с эффектом Максвелла – Вагнера (МВ). Этот вывод сделан в связи с отсутствием в грунте солей, глины и магнитных минералов, а также недостаточной для удержания адсорбированной воды площадью поверхности минерального кварцевого каркаса. Проявление МВ связано с накоплением на межфазных границах гетерогенных сред поверхностных зарядов и их поляризацией в электромагнитных полях [129]. В этой работе предположено, что вероятным почвенным включением, приводящим к аномальному поглощению электромагнитных волн, могли быть частицы гипса, покрытые водой, содержащей растворенные в ней ионы гипса.

Горные породы, как и любые слоистые структуры, поддерживающие механизм поляризации МВ, демонстрируют очень большой диапазон эффективной электрической проницаемости [139]. Влияние МВ на диэлектрические свойства горных пород зависит от влажности исследуемых образцов. В работе [137] зарегистрировано быстрое увеличение показателя преломления песчаных грунтов с ростом влажности. Этот рост не является монотонным и характеризуется некоторым критическим значением влажности, после достижения которого рост замедляется. Предложенная в работе [137] интерпретация наблюдаемой

зависимости основана на том, что отношение поверхностной воды к объемной воде в поровом пространстве песчаника контролирует диэлектрическую реакцию через механизм Максвелла – Вагнера. Влияние МВ на величину диэлектрического проявления зависит от формы и размера пор, адсорбционной активности зерен горной породы, минерализации жидкой фазы и др.

Данный раздел исследования посвящен изучению свойств поверхности глинистых зерен бентонита, а также оценке диэлектрического эффекта в зависимости от размера гипсовых включений при низкой влажности образцов минеральных композиций. Измерения относительной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости образцов выполнены резонансным методом в диапазоне частот 1200–1700 МГц [89]. Анализ результатов позволяет оценить диэлектрический эффект от плотности образцов, МВ и изменения влажности.

### ***3.2.1 Материалы и подготовка образцов***

В качестве материала для исследования выбран бентонит марки Kutch, в который добавлялся гипс. Исследование химического состава бентонита Kutch выполнено в работе [140]. В работе [138] отмечено, что бентонит может содержать до 80 % смектита в виде монтмориллонита (Kutch BF 04) и бейделлита (Kutch BF 08). Kutch BF 04 и Kutch BF 08 практически не содержат крупных зерен, превышающих 63 мкм. В их составе наблюдается заметный вклад полевого шпата и кварца. Основное отличие этих глин наблюдается в емкости катионного обмена (ЕКО). Для Kutch BF 04 ЕКО равна 97 мэкв/100 г и состав обменных катионов имеет вид:  $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} \gg \text{K}$ . Для Kutch BF 08 ЕКО равна 89 мэкв/100 г и состав обменных катионов имеет вид:  $\text{Na} \gg \text{Ca} = \text{Mg} \gg \text{K}$ . Концентрация наиболее значимых химических соединений приведена в таблице 3.5. В этой же таблице приведены средние значения концентраций, которые будут использованы далее при анализе данных микрофотосъемки.

Таблица 3.5 – Концентрация наиболее значимых химических соединений в бентоните марки Kutch

Химическое соединение	Kutch (Taroo and Patel 1986)	Kutch BF 04 (Olsson and Karnland 2009)	Kutch BF 08 (Olsson and Karnland 2009)	Среднее значение концентрации
SiO <sub>2</sub>	45,16	51,05	51,93	49,38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,84	14,90	17,53	16,09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,66	16,17	13,41	12,41
MnO	0,00	0,2	0,07	0,09
TiO <sub>2</sub>	0,87	2,94	3,43	2,41
CaO	2,63	1,98	0,98	1,86
MgO	3,82	3,26	2,35	3,14
Na <sub>2</sub> O	0,08	1,87	2,61	1,52

Перейдем от наиболее значимых химических соединений бентонита к наиболее значимым химическим элементам. Воспользуемся усредненными значениями концентрации соединений (см. таблицу 3.5). Результаты расчета атомных массовых концентраций в пересчете на единичную массу кремния приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Концентрация наиболее значимых химических элементов, зарегистрированных в бентоните и образцах первого и второго типов

Химические элементы	Бентонит		Образец первого типа <sup>*)</sup>			Образец второго типа
	Литература (см. таблицу 3.5)	Данные настоящего исследования	Участок А	Участок В	Расчет для участка В	Данные настоящего исследования
Si	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
O	1,63	2,06	0,75	2,15	2,54	1,79
Al	0,37	0,40	0,35	0,39	0,34	0,38
Fe	0,38	0,22	0,42	0,59	0,42	0,62
Mg	0,08	0,06	0,05	0,04	0,05	0,06
Na	0,03	0,09	0,04	0,08	0,04	0,00
Ca	0,06	0,04	0,08	1,20	1,20	0,15
S	0,00	0,00	0,06	0,77	0,95	0,00

<sup>\*)</sup> на темном фоне приведены относительные концентрации ионов, связанные с внесением гипса.



На основе бентонита были подготовлены два типа образцов. Образцы первого типа получены смешиванием бентонита и гипса, предварительно измельченных в ступке. Массовая концентрация гипса в образцах выбрана равной 0; 7,5; 15; 30 и 50 %. Каждая из смесей минералов засыпалась совместно с 250 стальными шарами диаметром 5 мм в размольный стакан объемом 80 мл и измельчалась в планетарной мельнице FRITSCH. Измельчение осуществлялось при 250 оборотах в минуту в течение 3 часов. После завершения помола полученная смесь минералов растиралась в ступке до сыпучего состояния. Окончательно образцы первого типа готовились из смеси минералов, высушенных до постоянной массы, увлажнением дистиллированной водой до требуемой влажности в диапазоне 0–20 %.

Образцы второго типа готовились добавлением 30 г смеси бентонита и порошкообразного строительного гипса (алебаstra) в дистиллированную воду объемом 3 литра. Массовая концентрация алебаstra в образцах выбрана равной 0; 7,5; 15; 30 и 50 %. Во избежание образования комков смесь бентонита и алебаstra добавлялась в воду небольшими порциями и перемешивалась в течение часа с помощью магнитной мешалки. Полученная взвесь обрабатывалась в ультразвуковой установке в течение 10 минут, после чего подвергалась центрифугированию в колбах объемом 50 мл при 6900 об/мин в течение 5 мин. Колбы с полученным осадком высушивались до постоянной массы. Далее высушенная смесь измельчалась в ступке до порошкообразного состояния, после чего смачивалась дистиллированной водой до требуемой влажности в диапазоне 0–20 %.

### ***3.2.2 Методы и результаты измерений***

В данной работе методами электронной микроскопии исследовалась микроструктура образцов первого и второго типа. Исследования выполнялись для оценки однородности образцов, а также оценки крупности кристаллов гипса после выполненной пробоподготовки. Микростроение минеральных агрегатов образца изучалось электронно-зондовыми методами с использованием растрового электронного микроскопа ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным

рентгеновским детектором (EDAX) модели X-Max 50N. Исследования проводились при ускоряющем напряжении от 2 до 10 кВ в режиме низкого вакуума.

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости был выбран метод резонансных измерений, изложенный в работах [89, 136]. Использован георадиолокационный частотный диапазон 1400–1700 МГц. В основу определения значения относительной диэлектрической проницаемости образца ( $\epsilon$ ) положено сравнение результатов прямых измерений резонансной частоты ( $f_{\text{рез}}$ ) с результатами измерений резонансных частот материалов с гарантированными диэлектрическими свойствами.

На рисунке 3.9 приведены результаты исследования крупности минеральных частиц бентонита. Видно, что микроструктура скелетная (зернистая), а глинистый материал в ней представлен беспорядочно ориентированными окатанными частицами глины. Размеры частиц глины не превышают 30,0 мкм, что согласуется с данными работы [138]. Здесь и далее определение размеров частиц выполнено с помощью свободно распространяемой программы обработки микрофотографий Gwyddion (<http://gwyddion.net>).

Сравнение полученных при микрофотографировании атомных концентраций бентонита (см. таблицу 3.6) с данными литературных источников позволяет отметить близкое совпадение концентрации металлов, отсутствие серы и заметное превышение концентрации кислорода в использованном бентоните (0,43 атома на атом кремния).

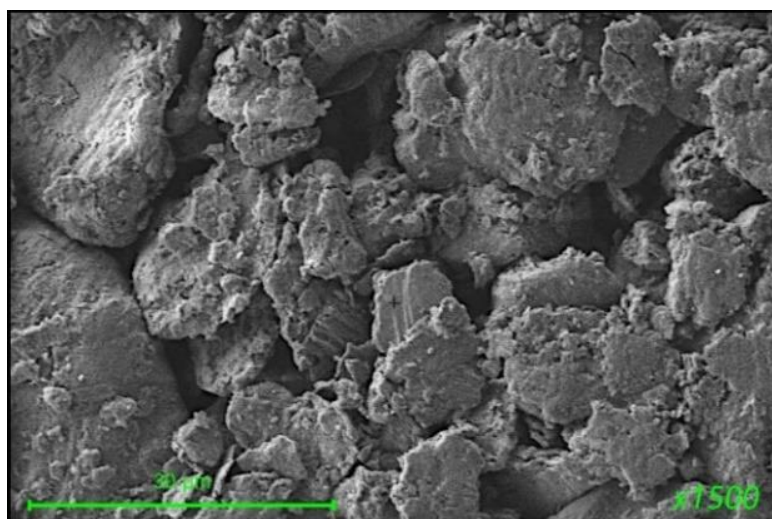


Рисунок 3.9 – Микрофотография поверхности глинистой частицы в бентоните

На рисунке 3.10 приведены результаты исследования крупности минеральных частиц образца первого типа с массовой концентрацией гипса 30 %. Учитывая концентрацию гипса и сравнивая рисунки 3.9 и 3.10, можно предположить, что участок А характеризуется налипанием на частицу смектита (плоские объекты) малого количества частиц гипса (светлые шарообразные объекты), в то время как на участке В частица смектита практически полностью покрыта частицами гипса. Из сделанного предположения следует, что частицы гипса более мелкие и покрывают поверхность глинистых частиц неравномерно. Средние размеры частиц гипса оцениваются значением 1,7 мкм. Размеры частиц глины, как и в образце первого типа, не превышают 30,0 мкм.

Косвенно в пользу сделанного предположения свидетельствует отсутствие серы в бентоните и на участке А и ее заметная концентрация в гипсе и на участке В (см. таблицу 3.6). Для количественной проверки предположения используем химическую формулу гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и следующее из нее массовое соотношение атомов гипса на единицу массы кальция:

$$\text{Gypsum} = 1 \cdot \text{Ca} + 0,80 \cdot \text{S} + 1,60 \cdot \text{O}. \quad (3.5)$$

Уравняем концентрации кальция на участках А и В, для чего добавим к концентрации А (см. таблицу 3.6) 1,12 массовой доли гипса. Результаты расчетов приведены в таблице 3.6 в колонке «Расчет для участка В». Сравнение данных для участка В приводит нас к выводу, что сделанное предположение о генезисе частиц позволяет получить относительную концентрацию ионов кислорода и серы гипса с точностью, близкой к 20 %. Оценка выполнена по данным таблицы 3.6, приведенным на темном фоне.

Соотносимость экспериментальных и рассчитанных значений концентраций участка В, приведенных в таблице 3.6, можно оценить коэффициентом корреляции Пирсона, который оказался равным 0,990. Расчетные значения концентраций, приведенные в таблице 3.6, позволяют сравнить вариацию числа частиц гипса в областях А и В по отношению весовых концентраций кальция и серы. В среднем по этим ионам она оказалась равной 1:14, что качественно наблюдается на рисунке

3.10 и свидетельствует о неравномерном распределении частиц гипса в смеси с бентонитом при выполненной пробоподготовке.

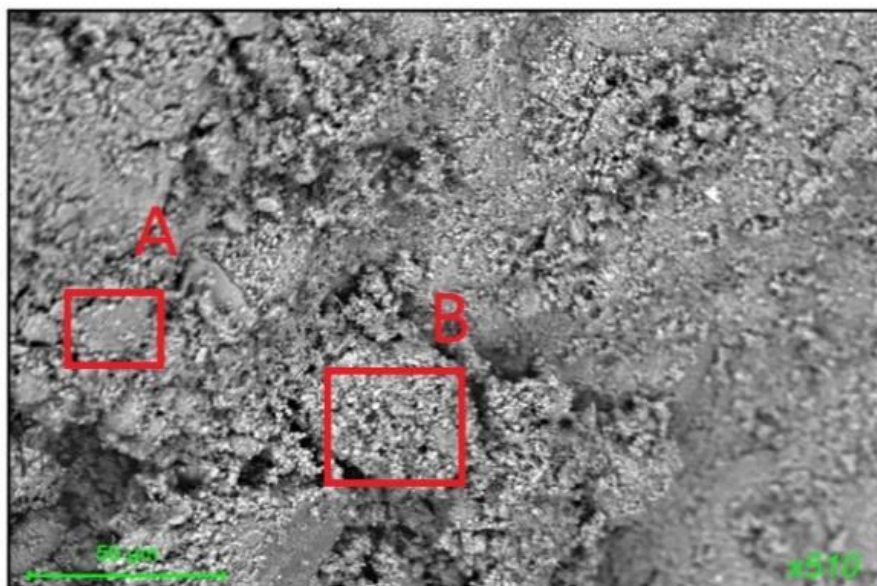


Рисунок 3.10 – Микрофотография поверхности смеси 70 % бентонита и 30 % гипса после помола первого типа

На рисунке 3.11 приведены результаты исследования крупности минеральных частиц образца второго типа с массовой концентрацией гипса в 15 %. Концентрация ионов второго образца приведена в таблице 3.6. Сравнение рисунков 3.9 и 3.11 позволяет отметить, что в результате пробоподготовки второго образца глинистые частицы разместились более упорядоченно. Сравнение рисунков 3.10 и 3.11 позволяет отметить отсутствие следов кристаллического гипса. Более того, в составе атомов образца второго типа (см. таблицу 3.6) отсутствует сера, а концентрация атомов кислорода близка к концентрации бентонита. При этом концентрация кальция в образце первого типа заметно выше, чем у образца второго типа. Отмеченные особенности могут быть связаны с тем, что гипс размывается водой. В присутствии глинистых материалов процесс размывания может приводить к адсорбции кальция и выносу из образца кислородных комплексов серы вместе с водой.

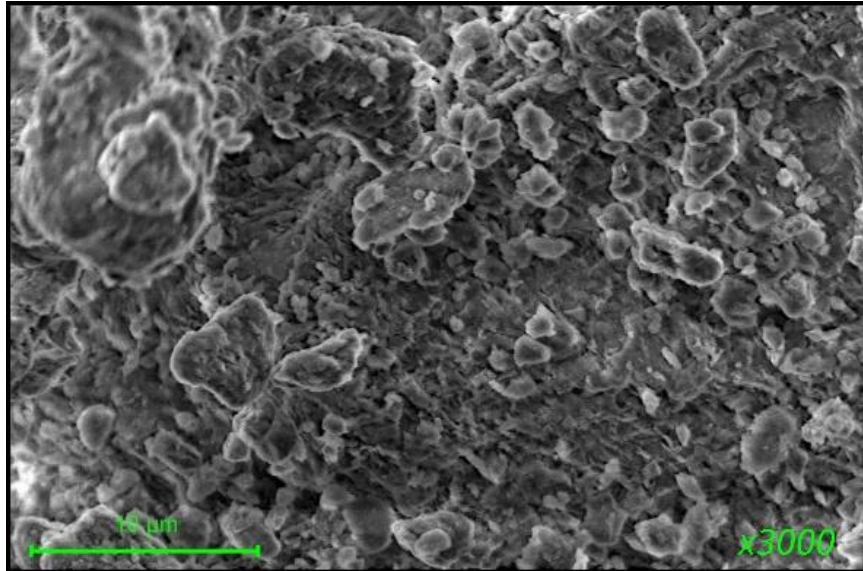


Рисунок 3.11 – Микрофотография поверхности глинистой частицы второго типа

С точки зрения структуры гетерогенной смеси бентонит представляет собой матрицу, в которую добавляются кристаллиты гипса (образец первого типа). В таком образце возможно проявление МВ. Образец второго типа моделирует длительное воздействие на образец первого типа жидкой фазы воды, в результате чего ион кальция сорбируется базальной поверхностью смектита, а сера, окруженная тетраэдром кислорода, вымывается из образца.

Результаты измерения относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) для образцов первого и второго типов в диапазоне влажностей ( $W$ ) 0–17 % приведены на рисунке 3.12, а и б соответственно. Для обозначения концентрации гипса ( $\mu$ ) в смеси минералов 0; 15 и 30 % использованы цвета и символы: ■, ●, ▲.

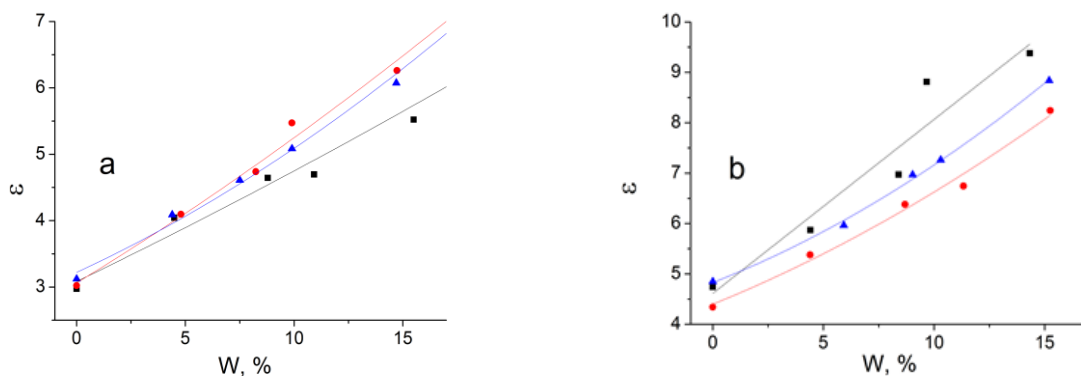


Рисунок 3.12 – Относительная диэлектрическая проницаемость образцов первого (а) и второго (б) типов

Экспериментальные значения  $\varepsilon$  аппроксимированы квадратичными зависимостями, цвета которых совпадают с цветами, выбранными для маркировки образцов.




$$\varepsilon = a + bW + cW^2. \quad (3.6)$$

Коэффициенты перед степенями влажности ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и коэффициенты детерминации ( $R^2$ ) квадратичных зависимостей приведены в таблице 3.7. На рисунке 3.12 видно, что у образцов первого и второго типов зависимость относительной диэлектрической проницаемости от концентрации гипса имеет противоположный характер. Поскольку образец второго типа характеризуется адсорбцией ионов кальция, можно предположить, что наблюдаемый эффект связан с особенностями формирования двойного электрического слоя на базальных поверхностях смектитов, меняющего пространственную ориентацию дипольных моментов молекул воды.

Таблица 3.7 – Параметры квадратичной аппроксимации результатов резонансных измерений  $\varepsilon$  по формуле (3.6)

$\mu, \%$	0			15			30		
	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
Образец первого типа	3,082	0,158	0,001	3,062	0,200	0,002	3,220	0,152	0,004
$R^2$	0,983			0,996			0,996		
Образец второго типа	4,613	0,345	0,000	4,398	0,178	0,004	4,828	0,172	0,006
$R^2$	0,849			0,978			0,996		

Выбор второй степени аппроксимирующего полинома результатов резонансных измерений связан с тем, что при ее повышении наблюдается нарушение плавности формы линии из-за погрешностей измерений, выполненных резонансным методом.

На рисунке 3.13 сопоставлены данные, приведенные на рисунке 3.12 для разных концентраций гипса ( $\mu$ ) в образцах. Для обозначения влажности образцов в смеси минералов 0%, 15% и 30% использованы цвета и символы: , , ;

штриховая линия относится ко образцу первого типа, а сплошная линия относится к образцу второго типа.

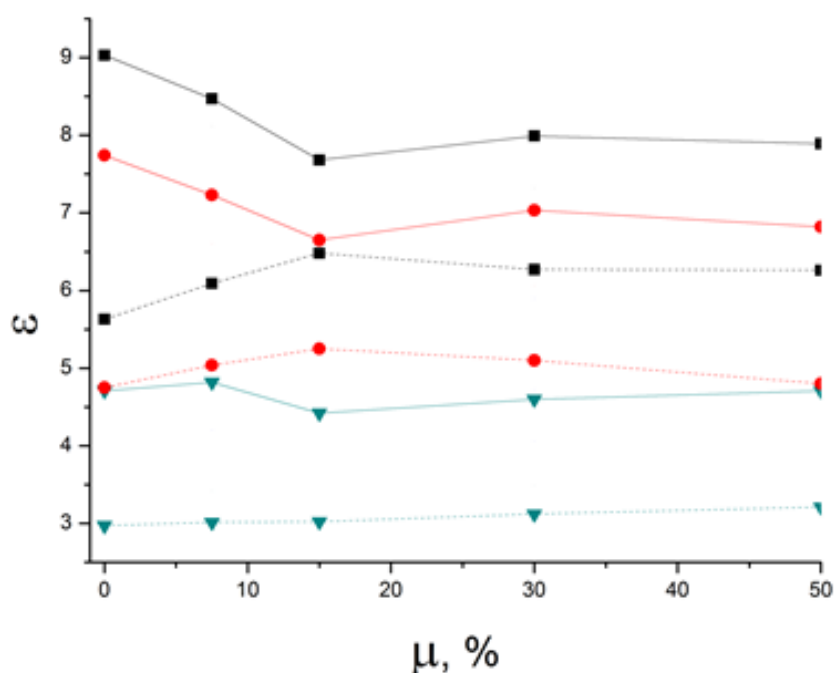


Рисунок 3.13 – Зависимость относительной диэлектрической проницаемости образцов от концентрации гипса при разной влажности

На рисунке 3.13 видно, что относительная диэлектрическая проницаемость образца второго типа в используемом диапазоне концентраций гипса и воды систематически выше, чем у образцов первого типа. Возникновение этой закономерности связано с отличием в плотности образцов, которые можно разместить в фиксированном объеме для вещества при резонансных измерениях. Согласно [25] изменение плотности вызывает изменение относительной диэлектрической проницаемости образца:

$$\varepsilon = \epsilon + Va(\omega)\Delta\rho / m, \quad (3.7)$$

где  $\epsilon$  – не зависящая от плотности часть относительной диэлектрической проницаемости;  $V$  – объем;  $\omega$  – угловая частота излучения (в случае георадара пропорциональна центральной частоте излучения передающей антенны в  $2\pi$  раз);  $a(\omega)$  – усредненная по макроскопическому объему образца поляризуемость совокупности молекул и фрагментов минеральных частиц;  $m$  – масса;  $\Delta\rho$  –



изменение плотности образца. Из формулы (3.7) следует, что увеличение плотности приводит к росту относительной диэлектрической проницаемости. Массы подвергнутых резонансным измерениям сухих образцов первого и второго типов при  $\mu = 0 \%$  отличаются в 1,7 раза, что качественно объясняет обсуждаемую закономерность.

На рисунке 3.13 видно, что относительная диэлектрическая проницаемость образцов обоих типов существенно увеличивается с ростом влажности. Изучение этой зависимости подразумевает использование надежных формул, связывающих диэлектрические свойства и влажность исследованных образцов. Анализ точности различных опубликованных петрофизических соотношений, используемых для получения оценок влажности грунтов [127], показал, что модель диэлектрического смешивания (Electromagnetic mixing formulas) Рота (Roth) является наиболее точной для всех грунтов, кроме супесей.

Для сравнения полученных результатов зависимости показателя преломления от влажности для образцов первого и второго типов воспользуемся формулой Рота (Roth) для показателя преломления:

$$n = (1 - \phi_f)n_s + \theta n_l + (\phi_f - \theta)n_g, \quad (3.8)$$

где  $n_s$ ,  $n_l$  и  $n_g = 1$  – показатели преломления твердой, жидкой и газовой фракций;  $\phi_f$  – пористость;  $\theta$  – объемная доля жидкой фракции (отношение объема жидкости в смеси к сумме объемов компонентов до смешивания). Из формулы (3.8) следует, что при  $n_l \gg n_g$  относительная диэлектрическая проницаемость растет с ростом влажности, а характер роста близок к квадратичному закону (3.6), что объясняет обсуждаемую закономерность.

На рисунке 3.13 видно, что у образца первого типа зависимость относительной диэлектрической проницаемости от концентрации гипса при  $\mu = 15 \%$  и влажности  $W = \sim 10\text{--}15 \%$  имеет максимум, происхождение которого может быть связано с проявлением МВ. Учет этого эффекта может позволить повысить качество интерпретации георадиолокационной информации, полученной на грунтах, содержащих гипс.



### 3.3 Апробация экспресс ИК-метода входного контроля грунтов при модификации его свойств добавлением алебаstra

В данном разделе представленный в п. 3.1 экспресс-метод полуколичественного анализа состава образцов по ИК-спектрам исследован на чувствительность к возможному изменению состава одного компонента. Эта модельная задача актуальна для строительства и ремонта земляного полотна, поскольку отражает модификацию свойств грунта добавлением неорганических и органических примесей. Для анализа состава глинистых частиц выделена и исследована методом ИК-спектроскопии пелитовая фракция эталонного полиминерального грунта с размером менее 0,01 мм, ранее изученного методом рентгеновского структурного анализа. Для изучения чувствительности метода к составу грунта будем добавлять в образец гипс (алебастр) в определенных количествах (таблица 3.8) и решать задачу (2.2).

Таблица 3.8 – Концентрации минералов и молекул в составе эталонного грунта и подготовленных образцов при добавлении гипса

Концентрация добавленного в эталонный грунт гипса	0 %	5 %		10 %		15 %		20 %		25 %	
Минерал/соединение, включенный в базис	а	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кальцевый монтмориллонит (Sca-3)	0,17	0,16	0,12	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,13	0,13
Нонтронит (Nau-1)	0,1	0,1	0,08	0,09	0,08	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Каолинит (kGa-1)	0,13	0,12	0,09	0,12	0,1	0,11	0,1	0,11	0,11	0,10	0,14
Диорит	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
Гранит	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	–0	0,03	0,02
Сепиолит SepSP-1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,0	0,03	0,01
Палыгорскит PF1-1	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	–0,01	0,02	0,01
Иллит IMt-2	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	–0,01	0,02	0,02
Мрамор	0,01	0,0	0,01	0,0	–0,01	0,0	–0,01	0,00	–0,03	0,0	–0,02
Мел	0	0	0,01	0	–0,01	0	–0,01	0	–0,03	0	–0,02
Торф	0,02	0,02	0,02	0,01	–0	0,01	0	0,01	–0,02	0,01	–0,02

Продолжение таблицы 3.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вода	0,00	0	0,00	0	-0,02	0	-0,02	0	-0,05	0	-0,03
Кальцит	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03
Хлорит	0,12	0,11	0,12	0,11	0,15	0,10	0,14	0,10	0,16	0,09	0,08
Полевой шпат	0,1	0,01	0,11	0,09	0,13	0,09	0,13	0,08	0,16	0,08	0,11
Кварц	0,08	0,08	0,11	0,07	0,13	0,07	0,14	0,07	0,17	0,06	0,15
Гипс	0,11	0,15	0,16	0,19	0,19	0,22	0,22	0,26	0,26	0,29	0,29

Результаты решения задачи (2.2) приведены в таблице 3.8. Буквой «а» обозначены результаты анализа состава эталонного грунта и ожидаемые результаты анализа состава образцов после добавления гипса. Буквой «б» обозначены результаты анализа состава грунтов при решении задачи (2.2).

Соответствующие ИК-спектры образцов приведены на рисунке 3.14. ИК – спектры образцов, приведенные на рисунке 3.14, нормированы так, что интенсивности полос с волновым числом  $1450\text{ см}^{-1}$  всех спектров равны 0,031. При этом интенсивности полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026\text{ см}^{-1}$  демонстрируют разные значения, зависящие от концентрации примеси алебаstra.

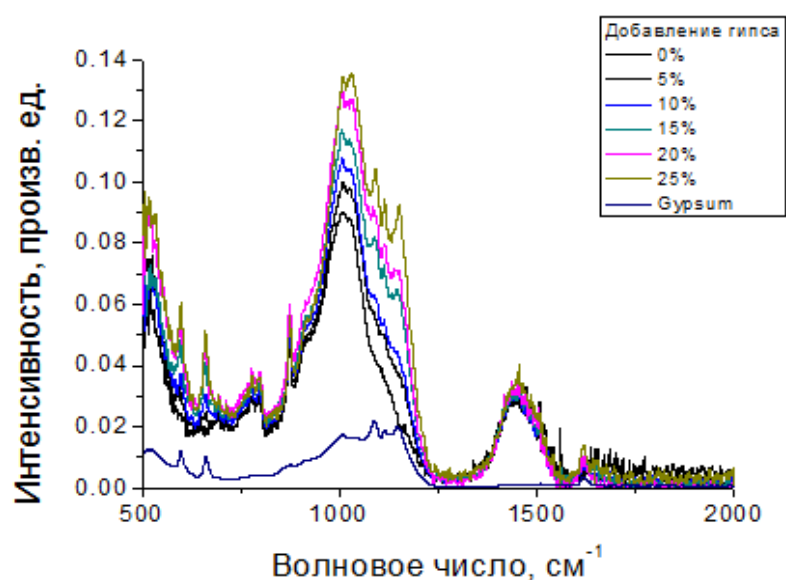


Рисунок 3.14 – ИК-спектры гипса и образцов

На рисунке 3.15 приведены рассчитанные и измеренные концентрации кальциевого монтмориллонита и гипса. Видно, что максимальное отклонение для монтмориллонита составляет примерно 10 %, а гипса – менее 5 %.

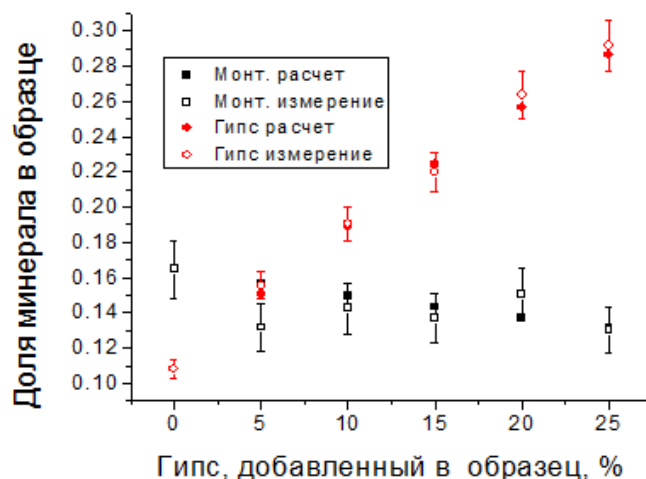


Рисунок 3.15 – Доля кальцевого монтмориллонита и гипса в образцах.

Вертикальными отрезками показаны отклонения в 10 % (черный цвет) и 5 % (красный цвет)

На рисунке 3.16 сопоставлены интенсивности полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026\text{ см}^{-1}$  и остаточная деформация образцов эталонного грунта при приложении давления  $0,611\text{ МПа}$  в зависимости от концентрации алебаstra. Приведенные результаты являются примером тарировки спектрометрических данных для определения механических параметров грунтов.

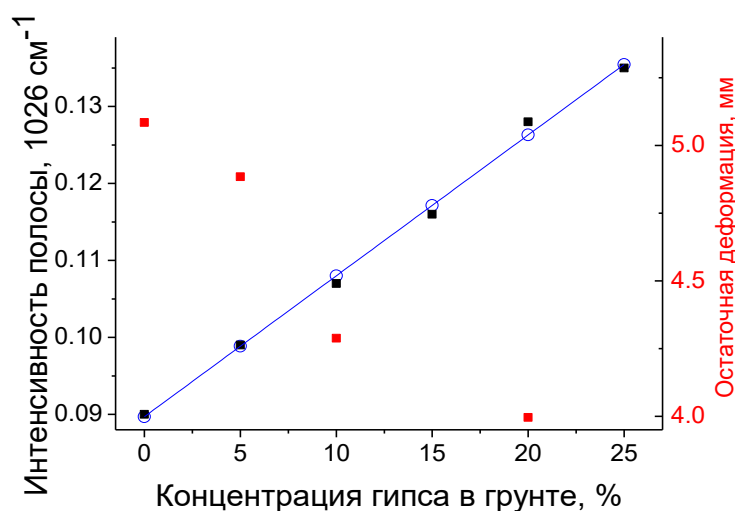


Рисунок 3.16 – Интенсивность полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026\text{ см}^{-1}$  (черный цвет), остаточная деформация (красный цвет) образцов эталонного грунта при приложении давления  $0,611\text{ МПа}$  в зависимости от концентрации алебаstra.

Синим цветом показаны результаты интерполяции интенсивности полосы

Для интерполяции связи интенсивности полосы I (см. рисунок 3.16) использовано соотношение, в котором концентрация алебаstra  $\mu$  измеряется в процентах:

$$I(\mu) = 0,00183 \mu + 0,08957.$$

На рисунке 3.17 остаточная деформация образцов эталонного грунта при приложении давления 0,611 МПа изображена в зависимости от интенсивности полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026 \text{ см}^{-1}$ .

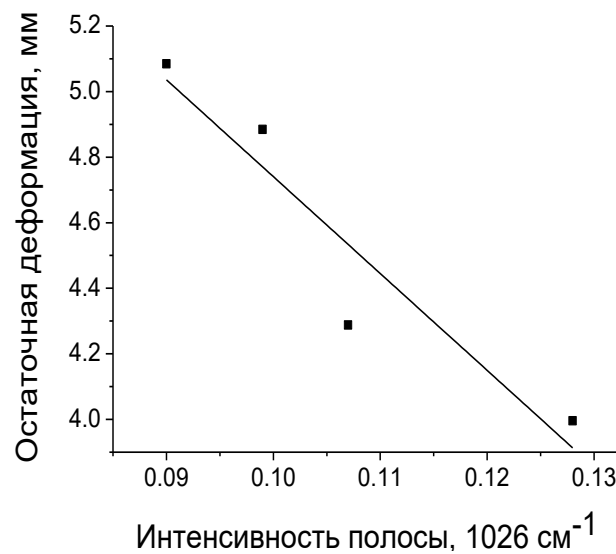


Рисунок 3.17 – Остаточная деформация образцов эталонного грунта при приложении давления 0,611 МПа в зависимости от интенсивности полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026 \text{ см}^{-1}$  при нормировке полосы с волновым числом  $1450 \text{ см}^{-1}$  всех спектров на 0,031 (см. рисунок 3.14)

Остаточная деформация определена согласно соотношению:

$$D = -29,5507 I + 7,69552,$$

из которого следует возможность связывать спектральные и прочностные характеристики грунтов схожего минерального состава.

### 3.4 Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев. Теория метода

В приближении нормального падения электромагнитных волн на границы раздела, ограничивающие грунтовый слой, его показатель преломления и толщина связаны соотношением:

$$h_1 = \frac{c\Delta t}{2n_1}, \quad (3.9)$$

где  $\Delta t$  – удвоенное время распространения электромагнитной волны между границами раздела;  $c$  – скорость света в вакууме.

Поскольку расстояние от антенного блока до отражающей поверхности  $h$  определяется условиями эксперимента, система уравнений (2.5), (3.6), (3.9) содержит шесть неизвестных величин:  $E_0$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $p_1$ ,  $n_1$ ,  $h_1$ . Значения  $E_0$ ,  $p$  можно определить тарировкой георадиолокационного оборудования, а  $p_1$  – обработкой георадиолокационных трасс.

Подвергнем георадиолокационную трассу ( $s$ ) преобразованию Гильберта и построим огибающую трассы по формуле:

$$G(h_i) = \sqrt{s_i(h_i)^2 + \hat{s}_i(h_i)^2}, \quad (3.10)$$

где глубина  $h_i$ , на которой размещен отражающий слой, определяется по формуле (3.9) с использованием соответствующего значения  $\Delta t_i$ ;  $\hat{s}_i$  – ортогональное дополнение трассы.

Аппроксимируем зависимость (3.10) экспоненциальной зависимостью. Подгонка результатов аппроксимации к огибающей выполнена минимизацией функционала:

$$\Delta = \sum_{i=k_1}^{k_2} Abs(G(h_i) - Ae^{-ph_i}), \quad (3.11)$$

где  $k_1 = m_1 + m_d$ ,  $k_2 = m_2 - m_d$ ; индекс  $i$  нумерует точки трассы;  $m_1$  – номер точки на верхней границе слоя;  $m_2$  – номер точки на нижней границе слоя;  $m_d$  –

выраженная в точках трассы полуширина отраженного верхней границей георадиолокационного сигнала.

В результате минимизации можно определить коэффициент ослабления электромагнитного излучения в грунтовом слое  $p_1$ . Уточнение численных значений величин  $n$  и  $p_1$  позволяет определить значение удельной проводимости грунтового слоя:

$$\sigma = \frac{2p_1 n}{\mu_0 c}, \quad (3.12)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Для оценки дренирования воды в грунтовом слое используем выражение для отражательной способности грунтового слоя:

$$F(h_k) = \sum_{i=k_1}^{k_2} G(h_i), \text{ а } F_{\max} = \sum_{i=k_1}^M G(h_i), \quad (3.13)$$

где  $M$  – общее число точек трассы.

Нормируем отражательную способность в некоторой точке слоя  $h_i$  на достигающий этой глубины георадиолокационный сигнал:

$$f(h_k) = \frac{1}{F_{\max} - \sum_{i=1}^{k-1} G(h_i)} G(h_k), \quad (3.14)$$

и вычисляем производную от нормированной отражательной способности:

$$\delta = \frac{\partial f(h_i)}{\partial h_i}. \quad (3.15)$$

Для автоматизации расчетов по формулам (2.5)–(2.10), (3.9)–(3.15) разработана программа GeoStudio для компьютера на языке Intel(R) Visual Fortran в виде проекта Windowing Application MDI. Сопряжение программы и аппаратной части георадара осуществляется указанием параметров  $E_0$ ,  $p$  и  $h$  в редактируемом файле перед началом выполнения программы. Программа позволяет по радарограммам, определенным на разных этапах дренирования, рассчитывать зависимости от времени показатель преломления, коэффициент ослабления электромагнитного излучения, удельную проводимость грунтового слоя, относительную отражательную способность грунтовых субслоев и ее

производную. Результаты расчета производной аппроксимируются полиномом, степень которого указывается в редактируемом входном файле перед началом выполнения программы. В данной работе она выбрана равной 5. При этом максимум полинома интерпретируется наличием субслоя с максимальной влажностью.

### **3.5 Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев. Экспериментальные исследования**

Для выполнения измерений в работе использован канал шестиканального георадара серии «Око» с номером регистрации № 027 и рупорной антенной с частотой генерации 1700 МГц и номером № 277. При измерениях регистрировались радарограммы, сформированные из 20 трасс, каждая из которых усреднялась по 32 независимым измерениям при развертке 24 нс. Обработка экспериментальных георадиолокационных разрезов, полученных в данной работе, включающая подавление низкочастотных и высокочастотных помех и вычисление огибающей трассы, выполнена однотипно с использованием компьютерного программного пакета Geoscan32, разработанного ООО «Логис». При выполнении экспериментальных исследований использована установка, изображенная на рисунке 2.9. Для исследований, выполненных в данной работе, использован мелкий барханный песок, размещенный в коробе. Свойства песка получены в ходе испытаний в научно-исследовательской испытательной лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве», аттестат аккредитации RA.RU.21PS69 выдан 18.02.2016. Максимальная толщина слоя песка в коробе составляла 0,58 м. Важным обстоятельством выполненных измерений явилось то, что конструкционный слой размещался в мешке из водонепроницаемого материала.

На рисунке 3.18 в качестве примера приведены фрагменты огибающих георадиолокационной трассы, относящихся к грунтовому слою до увлажнения и сразу после увлажнения 15 литрами дистиллированной воды. На этом же рисунке

приведены результаты аппроксимации этих линий экспоненциальными зависимостями, полученными минимизацией функционала (3.9).

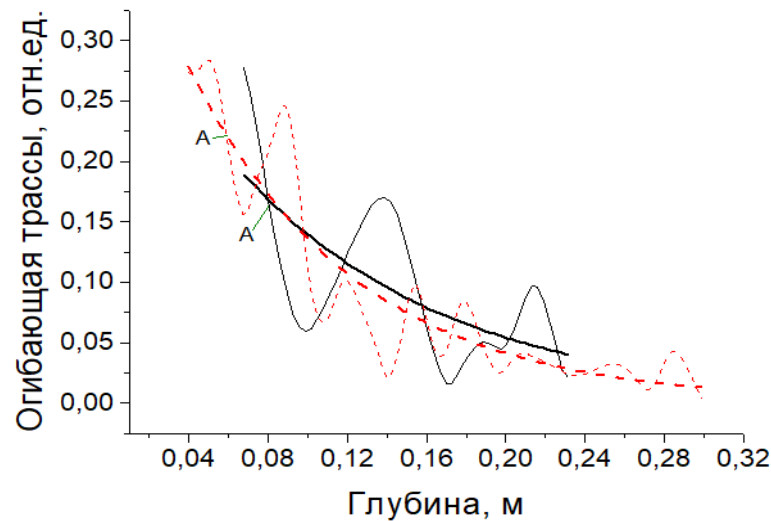


Рисунок 3.18 – Огибающие трасс, полученные до увлажнения (—) и сразу после увлажнения (---), и их экспоненциальные аппроксимации

На рисунке 3.19 приведены результаты определения коэффициентов ослабления в зависимости от времени с момента увлажнения.

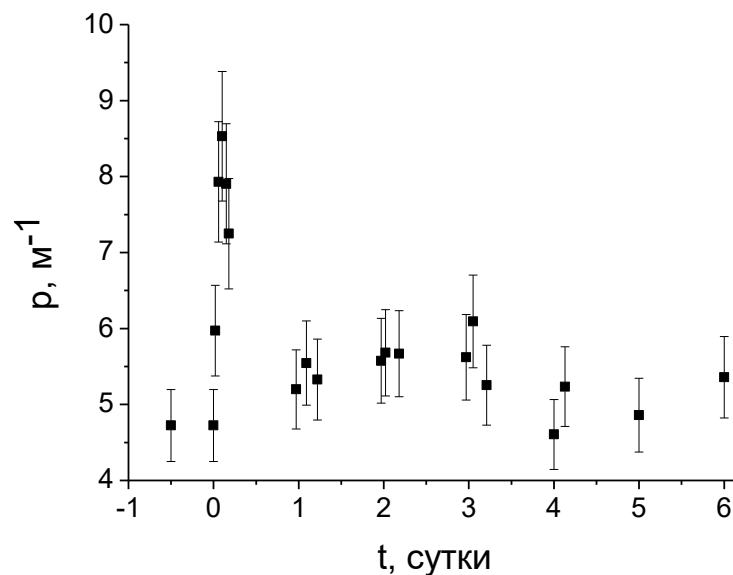


Рисунок 3.19 – Коэффициенты ослабления песчаного слоя. Увлажнение слоя выполнено в момент времени, соответствующий 0 суток. Вертикальными отрезками показаны погрешности величиной 10 %



Показатель преломления грунтового слоя рассчитан с использованием формулы (2.5). Результаты расчетов приведены на рисунке 3.20 в зависимости от времени с момента увлажнения.

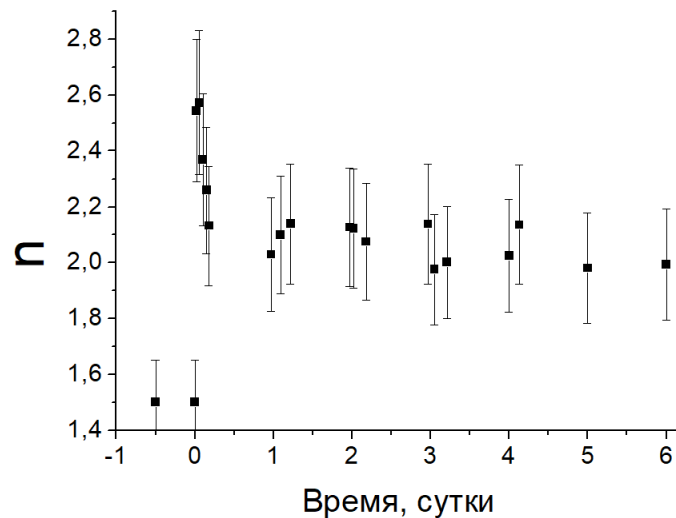


Рисунок 3.20 – Показатель преломления песочного слоя. Увлажнение слоя выполнено в момент времени, соответствующий 0 суток. Вертикальными отрезками показаны погрешности величиной 10 %

Определение коэффициентов ослабления электромагнитного излучения и показателей преломления в зависимости от времени дренирования воды в грунтовом слое позволяет вычислить по формуле (3.10) удельную проводимость. Результаты расчета приведены на рисунке 3.21.

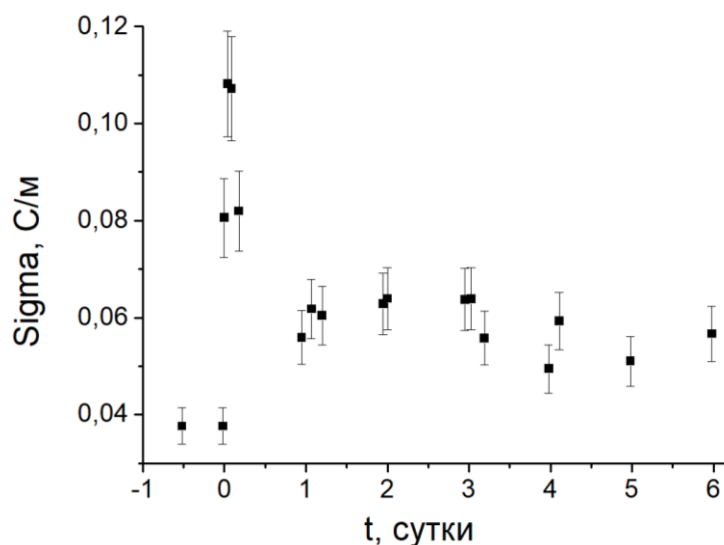


Рисунок 3.21 – Удельная проводимость песчаного слоя. Увлажнение слоя выполнено в момент времени, соответствующий 0 суток. Вертикальными отрезками показаны погрешности величиной 10 %

Для оценки дренирования воды в грунтовом слое используем выражения (3.13), (3.14). На рисунке 3.22 приведены результаты расчетов относительной отражательной способности грунтового слоя на разных глубинах. Изображенные линии получены для разных отрезков времени после увлажнения песчаного слоя.

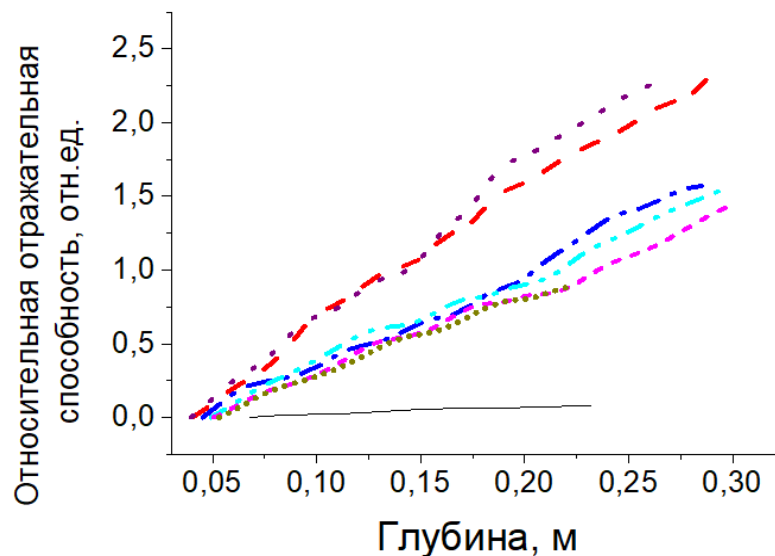


Рисунок 3.22 – Относительная отражательная способность песчаного слоя, рассчитанная для времени с момента увлажнения: до увлажнения (—); после увлажнения (---); через 1 час после увлажнения (····); через 3 часа после увлажнения (·-·-); через 3 суток после увлажнения (-·-·); через 5 суток после увлажнения (-·-·); через 8 суток после увлажнения (- - -); через 8 суток после увлажнения (····)

Оценка немонотонного поведения относительной отражательной способности электромагнитного излучения может определяться формулой (3.13) и характеризовать глубину слоя, обладающего максимальной влажностью. Результаты соответствующих расчетов приведены на рисунке 3.23. На рисунке 3.24 эти глубины сопоставлены с положениями слоев с максимальной влажностью, определенной прямым методом [51].

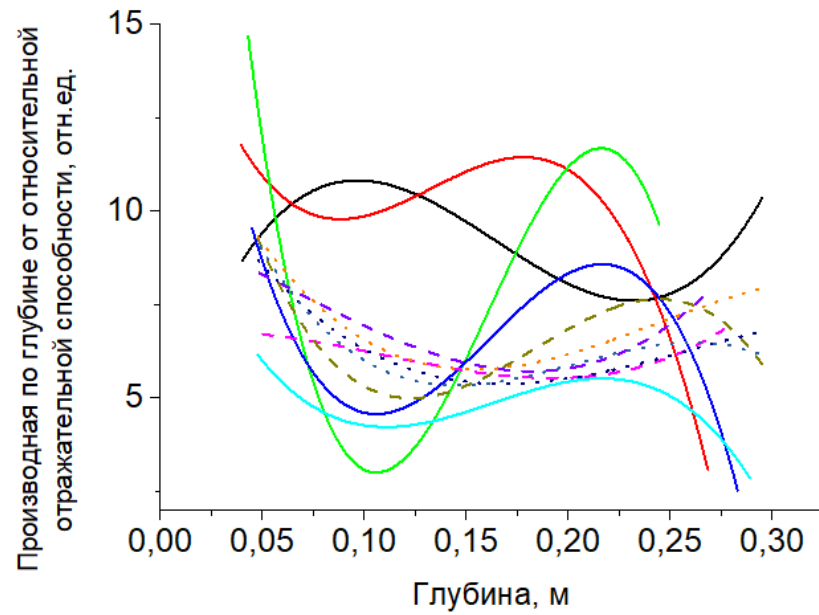


Рисунок 3.23 – Производная по глубине от относительной отражательной способности песочного слоя, рассчитанная для времени после увлажнения: непосредственно после увлажнения (—); через 1 час (—); через 2 часа (—); через 3 часа (—), через 4 часа (—); через 19 часов (—); через 22 часа (—); через 25 часов (—); через 42 часа (····); через 45 часов (····); через 48 часов (····)

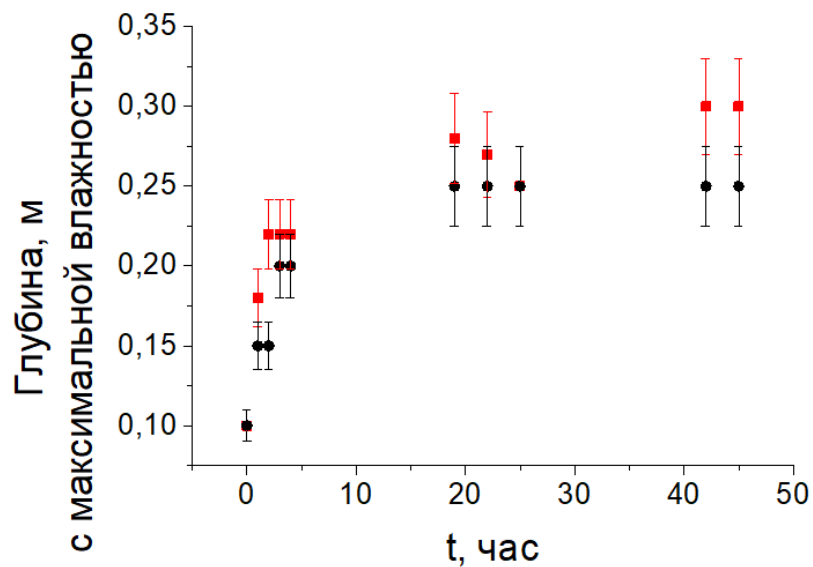


Рисунок 3.24 – Глубина слоя с максимальной влажностью:

(■) – метод георадиолокации; (●) – прямое измерение.

Вертикальными отрезками показаны 10 % погрешности

Особенность построения огибающей при определении коэффициента ослабления электромагнитного излучения грунтовым слоем связана с выбором величины первой точки аппроксимирующей экспоненциальной зависимости. Как видно на рисунке 3.18, алгоритм вычисления построен таким образом, что аппроксимирующая кривая проходит через точку, определенную минимизацией функционала (3.11) вблизи среднего значения (точка А, рисунок 3.18) на первой «полуволне» огибающей. Коэффициенты ослабления, определенные при этом, приведены на рисунке 3.19 и относятся ко всему конструкционному слою, глубина которого учтена при минимизации функционала (3.11). Поскольку процесс диффузии протекает конечное время, рассчитанные таким образом коэффициенты затухания относятся к неравномерно увлажненным конструкционным слоям. По мере протекания времени диффузии неоднородность влажности грунта уменьшается и вместе с ней уменьшаются коэффициенты затухания, стремясь к некоторому значению, соответствующему стационарному распределению влажности по глубине конструкционного слоя, размещенного на непроводящем воду разделительном материале. Известно, что отраженное верхней поверхностью грунтового слоя электромагнитное излучение формируется отражением от микрослоев грунта, размещенных на глубинах до  $\lambda/4$  [77]. В связи с этим уменьшение влажности верхней части конструкционного слоя при дренировании воды вглубь слоя приводит к снижению показателя преломления, определенного по формуле, как показано на рисунке 3.20. Соотношение (3.12) для расчета удельной проводимости грунта конструкционного слоя в нашем случае содержит усредненное значение коэффициента ослабления по глубине слоя и показатель преломления, характеризующий в основном материал вблизи верхней границы. В связи с этим результаты расчета удельной проводимости будут скорее всего относиться к поверхностным субслоям конструкционного слоя (см. рисунок 3.21).

На рисунке 3.22 представлены результаты расчета относительной отражательной способности дренирующего грунта разной влажности. Видно, что форма этой зависимости близка к прямой линии, а величина влажности определяет угол ее наклона к оси глубины. Дренирующий грунт в естественно сухом

состоянии характеризуется формой зависимости относительной отражательной способности, приближенной к линейной, расположенной практически параллельно оси глубины. Увлажнение верхней части конструкционного слоя приводит к существенному увеличению угла наклона, который уменьшается при дренировании воды и стремится к стабилизации при приближении влажности к стационарному состоянию. Вместе с этим форма зависимости относительной отражательной способности несколько отличается от линейной. На рисунке 3.23 представлены зависимости производной от этой величины по глубине конструкционного слоя. Видно, что по мере дренирования воды максимум производной смещается к нижней границе конструкционного слоя. Глубина, соответствующая максимуму, представлена на рисунке 3.24 в зависимости от времени дренирования воды. На этом же рисунке приведены результаты прямых измерений влажности образцов, отобранных с разных глубин конструкционного слоя. Из сравнения приведенных теоретических и экспериментальных результатов можно сделать вывод о 10 %-ном расхождении расчетных данных с итогами эксперимента. Зависимость глубины с максимальной влажностью существенно нелинейная в зависимости от времени дренирования. Для использованного в нашем исследовании дренирующего материала ее основное изменение приходится на первые 10–15 часов. Это время может характеризовать дренирующие свойства грунта и использоваться при выработке технологических решений при выполнении строительных работ по уплотнению земляного полотна.

### **3.6 Сравнение дренирующих свойств слоев различных песков.**

#### **Экспериментальные исследования**

##### ***3.6.1 Используемые образцы и выполненные эксперименты***

Данный раздел посвящен исследованию закономерностей дренирования воды через песчаные слои с разными свойствами, что может быть востребовано при реализации технологического процесса увлажнения конструкционных грунтовых слоев при их подготовке к уплотнению при строительстве земляного полотна.

При выполнении экспериментальных исследований использована установка, подробно рассмотренная в разделе 2.3.2. Антенный блок размещался на высоте 0,3 м над поверхностью песка. Для выполнения измерений в работе использован канал шестиканального георадара серии «Око» с номером регистрации № 027 и рупорной антенной с частотой генерации 1700 МГц и номером № 278 ( $E_0 = 40\,000$ ,  $p = 1,76$ ). При измерениях регистрировались радарограммы, сформированные из 20 трасс, каждая из которых усреднялась по 32 независимым измерениям при развертке 24 нс. Обработка экспериментальных георадиолокационных разрезов, полученных в данной работе, включающая вычисление огибающей трассы, выполнена в специально разработанной программе GeoStudio. Для исследований, выполненных в данной работе, использованы два типа песка, некоторые характеристики которых получены в ходе испытаний в лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве», аттестат аккредитации RA.RU.21PS69 выдан 18.02.2016, и приведены в таблице 3.9. Максимальная толщина слоя песка в коробе составляла 0,58 м. Как и ранее, важным обстоятельством выполненных измерений явилось то, что конструкционный слой толщиной 0,3 м размещался в мешке из герметичного материала, препятствующем дренированию воды в нижележащие слои.

Таблица 3.9 – Параметры использованных песков, определенные согласно [95, 51]

Параметр	Образец 1	Образец 2
1. Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,69	1,69
2. Оптимальная влажность, %	14,0	13,3
3. Коэффициент фильтрации, м/сут	5,12	3,02
4. Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,49	1,42
5. Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,68	2,68
6. Пустотность $k_v$ , %	44,4	47,1

В данном исследовании были выполнены следующие эксперименты:

- эксперимент № 1: образец № 1 увлажнялся 15,1 л воды;
- эксперимент № 2: образец № 2 увлажнялся 22,8 л воды;
- эксперимент № 3: образец № 2 увлажнялся 15,1 л воды;
- эксперимент № 4: образец № 1 увлажнялся 15,1 л воды, толщина слоя песка выбрана равной 0,6 м.

Каждая съемка георадаром сопровождалась отбором проб песка для определения влажности на поверхности и на глубинах 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 м.

### 3.6.2 Сравнение полученных результатов

На рисунке 3.25 приведены результаты расчета зависимости показателя преломления от времени дренирования, определенные согласно выражению (2.6).

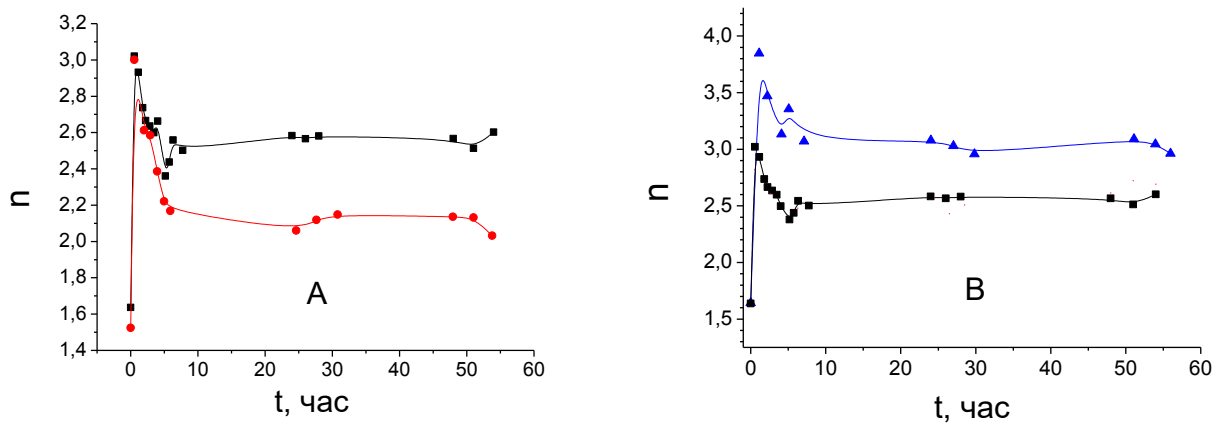


Рисунок 3.25 – Зависимость показателя преломления от времени дренирования воды (красный цвет ● – эксперимент 1; черный цвет ■ – эксперимент 3; синий цвет ▲ – эксперимент 2)

На рисунке 3.25, А видно, что непосредственно после увлажнения одинаковым количеством воды показатели преломления совпадают с точностью до погрешности измерений и практически не зависят от свойств среды. Это можно объяснить тем, что отраженный сигнал формируется в верхнем слое образца толщиной  $\lambda/4n$  [137]. В этом слое в начальные моменты дренирования значения показателя преломления определяются в основном показателем преломления воды, заметно превышающим показатель преломления любого сухого песка.

За время дренирования 5–10 часов отличия в показателях преломления возрастают и стабилизируются на значениях 2,1 и 2,6 для первого и третьего экспериментов соответственно, что связано с проявлением свойств дренирующих слоев и с неизменным количеством воды в исследуемом слое.

Увеличение расхода воды в песке постоянного состава, продемонстрированное на рисунке 3.25, В, позволяет отметить рост показателя преломления в начальный момент времени дренирования, что объясняется ростом влажности поверхностных субслоев. За время дренирования 5–10 часов отличия в показателях преломления стабилизируются на значениях 2,6 и 3,1 для первого и третьего экспериментов соответственно, что связано исключительно с неизменным количеством воды в исследуемом слое.

На рисунке 3.26 приведены результаты расчета относительной отражательной способности песчаных субслоев, выполненного по формуле (3.12).

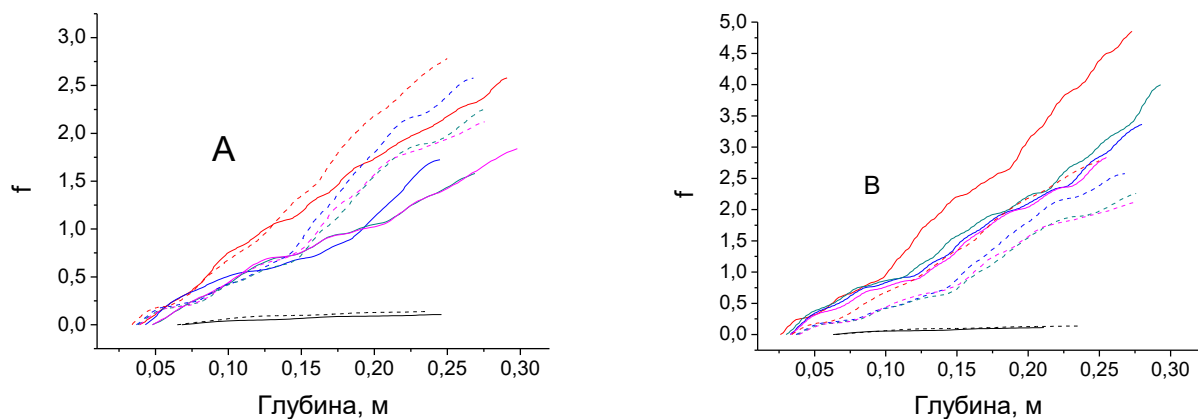


Рисунок 3.26 – Зависимость относительной отражательной способности от глубины при разном времени дренирования. Результаты для экспериментов 1, 3 и 2, 3 приведены на панелях А и В соответственно. Штриховые линии относятся к эксперименту 3

Использованные при изображении рисунка цвета линий относятся к результатам расчета в момент времени: черный цвет – до увлажнения; красный – через 0,5 часа; синий цвет – через 3 часа; зеленый – через 4 часа; розовый цвет – спустя 6 часов после замачивания.

Из таблицы 3.2 следует, что через второй образец вода дренирует медленнее. Этот факт на рисунке 3.26, А объясняет то, что отражательная способность его субслоев, как более влажных, больше, чем для первого образца. Добавление воды



при замачивании второго образца приводит к еще большему росту относительной отражательной способности, как видно на рисунке 3.26, В.

Сопоставление некоторых результатов, полученных для экспериментов 1 и 4, приведено на рисунке 3.27. Использованные при изображении рисунка цвета линий относятся к результатам расчета в момент времени: черный – до увлажнения; красный – через 0,5 ч; синий цвет – через 6 часов после замачивания.

Из сравнения приведенных данных можно сделать вывод о том, что увеличенный расход воды (эксперимент 4) приводит к росту относительной отражательной способности в начальный момент времени, а увеличение толщины слоя приводит к уменьшению относительной отражательной способности в конце наблюдений.

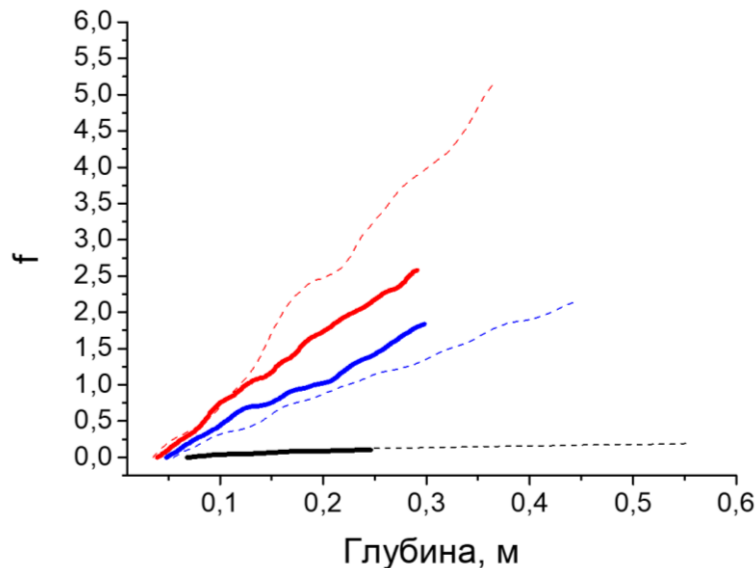


Рисунок 3.27 – Зависимость относительной отражательной способности от глубины при разном времени дренирования. Результаты для экспериментов 1 (сплошная линия), 4 (штриховая линия)

На рисунке 3.28 приведены результаты сопоставления максимума аппроксимационного полинома результатов расчета по формуле (3.13) и экспериментально определенного положения максимально увлажненного субслоя ( $h$ ) для рассмотренных экспериментов в разные моменты времени. При построении рисунков величина  $h$  отсчитана от верхней границы слоя песка.

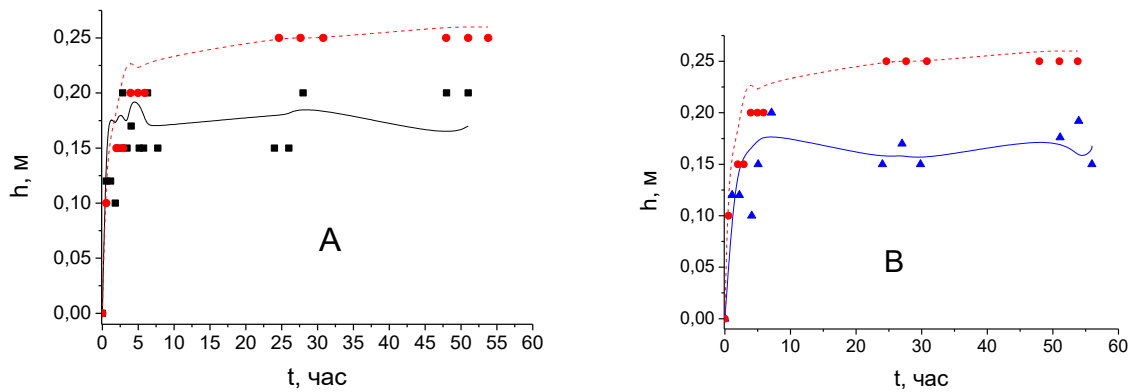


Рисунок 3.28 – Зависимость глубины водонасыщенного слоя от времени дренирования воды (сплошная черная линия – эксперимент 1; штриховая красная линия – эксперимент 3; сплошная синяя линия – эксперимент 2).

Результаты определения положения наиболее увлажненных субслоев выполнены методом прямых измерений и приведены соответственно: черным цветом ■ – эксперимент 1; красным цветом ● – эксперимент 3; синим цветом ▲ – эксперимент 2

Из сравнения данных, приведенных на рисунке 3.28, А, следует, что хорошо дренирующий образец 1 (см. таблицу 3.9) позволяет воде собраться у нижней границы слоя так, что водонасыщенные субслои начинаются на глубинах 0,17–0,20 м. Хуже дренирующий образец 2, при дренировании такого же количества воды, заметную ее часть удерживает на поверхности своих частиц, в результате чего граница водонасыщенных субслоев опускается к отметке 0,25 м.

Если этот образец увлажнить дополнительным количеством воды, доведя его до 22,8 л, граница водонасыщенных субслоев смещается к уровню 0,15–0,17м, как это видно из рисунка 3.28, В.

Оценим положение верхнего водонасыщенного слоя ( $h$ ), используя объем израсходованной воды ( $V$ ), его высоту ( $l$ ), площадь поперечного сечения образца ( $S$ ) и коэффициент пустотности ( $k_v$ , см. таблицу 3.9):

$$h = l - \frac{V}{S \cdot k_v}. \quad (3.16)$$

Расчеты по формуле (3.16) для расхода воды 22,8 и 15,1 л дали соответственно значения 0,16 и 0,21 м, которые хорошо коррелируют с данными рисунка 3.18, В.

На рисунке 3.29 сопоставлены результаты максимумов аппроксимационного полинома расчетов по формуле (3.15) для эксперимента 1 (черный цвет) и эксперимента 4 (красный цвет). Видно, что процесс дренирования завершается раньше в более тонком слое, а положение наиболее увлажненного слоя в начальные моменты времени меняется линейно от времени.

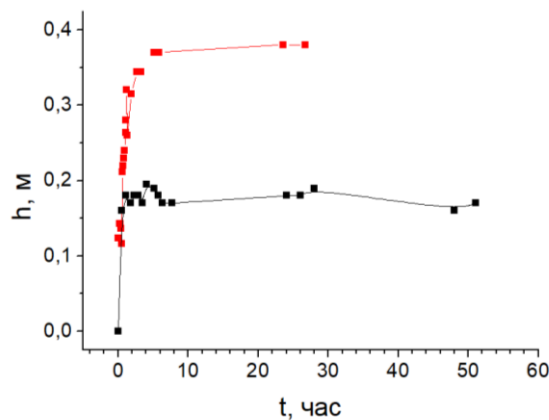


Рисунок 3.29 – Зависимость глубины водонасыщенного слоя от времени дренирования воды (сплошная черная линия и ■ – эксперимент 1; сплошная красная линия ■ – эксперимент 4)

### 3.7 Измерение влажности песка методом резонансных измерений

Рассмотрим третий георадиолокационный эксперимент (п. 3.6.1) в установке, описанной в разделе 2.3.2, при котором пробы образца № 2 с поверхности в процессе дренирования воды дополнительно подвергались резонансному измерению показателя преломления и влажности по методикам, изложенным в главе 2. Соответствующие измерения выполнялись с определенным интервалом времени и в общей сложности длились 5 ч 30 мин, в течение которых резонансная частота изменялась в диапазоне 1354,19–1393,51 МГц, что связано с перемещением воды в нижние слои. Результаты обработки экспериментальных данных

представлены на рисунке 3.20. Предположим, что экспериментально определенное значение показателя преломления можно рассчитать по формуле:

$$n = \sqrt{\varepsilon_0 + w\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3.17)$$

где  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость сухого песка и  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  – диэлектрическая проницаемость воды на частотах резонансного эксперимента.

Будем варьировать значение  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  до наиболее близкого совпадения с экспериментом. На рисунке 3.30 приведены результаты расчета по формуле (3.17) для значений диэлектрической проницаемости воды 81 (красная линия), 71 (синяя линия), 61 (зеленая линия), 51 (розовая линия). Сравнение этих линий с линейной аппроксимацией экспериментальных результатов измерений позволяет определить значение диэлектрической проницаемости воды и ее погрешности величиной  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 66 \pm 2$ . Тогда значение влажности заранее исследованного песка при его подготовке к работам по уплотнению можно определить по формуле, полученной из (3.18):

$$w = \frac{n^2 - \varepsilon_0}{\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (3.18)$$

где  $n$  определяется соотношением (2.6) с учетом параметров тарировки антенных блоков.

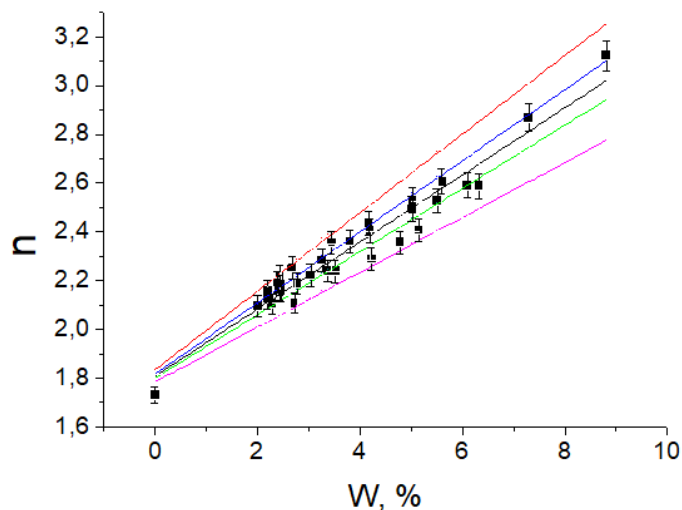


Рисунок 3.30 – Зависимость показателя преломления от влажности образца № 1 (■), полученная при проведении эксперимента № 3. Прямая черного цвета – результат линейной аппроксимации эксперимента. Вертикальными отрезками указаны погрешности 2 %

### 3.8 Выводы по главе

Апробирован экспресс-метод полуколичественного анализа грунтов из притрассовых карьеров. Реализованная в работе численная процедура позволяет определить изменение состава и влажности грунта близкого минерального состава с точностью 10–15 %.

Применение предложенного экспресс-метода при входном контроле позволяет оценивать однородность свойств грунтов, поступающих для строительства. Выявляемые существенные изменения свойств позволяют своевременно вносить изменения в проект и избегать логистических ошибок при организации строительства.

Повышение точности разработанного метода может быть связано с учетом механизмов ионных замещений в минералах [33], их смешаннослойного строения [34], спектрального проявления [35] и взаимодействия в водной среде [36]. Эти особенности строения грунтов должны выясняться на стадии проектирования. Моделирование этих особенностей может быть выполнено расширением базисного набора соответствующих спектров (3.1) и в данной работе не рассмотрено.

Микрофотографические исследования свойств базальных поверхностей глинистых частиц позволили установить, что в смеси бентонита и гипса:

- при механической пробоподготовке частицы гипса распределяются неравномерно по глинистым частицам;
- в результате осаждения гипса из раствора глинистые частицы размещаются более упорядоченно, при этом отсутствуют следы кристаллического гипса;
- в составе атомов образца второго типа отсутствует сера, концентрация атомов кислорода близка к концентрации бентонита, и концентрация кальция в образце первого типа заметно выше, чем у образца второго типа. Отмеченные особенности могут быть связаны с тем, что гипс размывается водой. В присутствии глинистых материалов процесс размывания может приводить к адсорбции кальция и выносу из образца кислородных комплексов серы вместе с водой.

Уменьшение глубинности георадиолокационной диагностики земляного полотна в засушливых районах, где естественная влажность составляет 10–15 %, может объясняться влиянием эффекта Максвелла – Вагнера на диэлектрическую проницаемость глинистых грунтов, определяющую скорость распространения электромагнитного излучения. Вместе с этим существенное влияние на эффективность применения метода могут оказывать инженерно-геологические условия, определяющие плотность и химический состав грунтов.

Установлена зависимость остаточной деформации модифицированного грунта от приложенной нагрузки при разной влажности и загипсованности, а также спектральные особенности полос ИК-спектров.

Построены феноменологические уравнения, связывающие:

- интенсивность полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026\text{ см}^{-1}$  с концентрацией внесенного гипса;
- прочностные характеристики глинистых грунтов с характеристиками, учитывающими атомные свойства составляющих грунты минералов, а именно интенсивностью полосы ИК-спектра с волновым числом  $1026\text{ см}^{-1}$ .

Данные, приведенные на рисунках 3.18–3.21, подтверждают вывод о том, что применение метода георадиолокации позволяет получить численные значения электрофизических параметров, характеризующих протекание процесса диффузии воды сквозь пористые почвенные слои. Кроме этого, предложенные методики по вычислению отражательной способности конструктивных слоев и их производной по глубине позволяют рассчитать глубину расположения наиболее увлажненного грунтового слоя, что необходимо для разработки технологического процесса увлажнения дренирующих грунтов при их подготовке к строительным работам.

Внедрение разработанных и апробированных в данной главе методов оперативного контроля обладает значительным экономическим потенциалом для повышения эффективности строительства и эксплуатации железнодорожного полотна. Актуальность этого направления подтверждается данными о значительных расходах на устранение дефектов. В 2019 году расходы на

оздоровление железнодорожного пути всеми видами ремонта составили 145 млрд. руб., что выше уровня 2018 года на 10,8%. За счет выполнения капитальных видов работ в 2019 году отремонтировано 6017,2 км пути. Вместе с этим, на 2019 г. дефектность земляного полотна составляет 10 % от эксплуатационной длины сети дорог, а именно около 8,5 тыс. км. Кроме того, средние расходы, направленные на устранение дефектов и деформаций земляного полотна, составляют около 3 – 4 млрд. руб. в год. Из представленных данных видно, что темпы устранения участков с дефектами и деформациями земляного полотна, как и объемы финансирования, недостаточны.

Для строящихся объектов существуют допустимые отклонения от проектных значений параметров состояния, которые составляют не более 10%. Таким образом, с вводом в эксплуатацию новых железнодорожных линий и дискретным контролем качества, компания ОАО «РЖД» может получить 10% прирост к общей протяженности «больного» земляного полотна. Так, например, на СКЖД за 2019 г. построено более 200 км пути. При наихудшем варианте сеть дорог может получить дополнительно около 20 км деформативного земляного полотна, что существенно повысит расходы на ремонт и снизит эксплуатационную надежность пути. Исходя из общих затрат на оздоровление железнодорожного пути 24 млн. руб. на 1 км, эффективность разработки в ближайшей перспективе (например, по СКЖД) составит по меньшей мере около 480 млн. руб. за счет предотвращения строительства некачественного земляного полотна.

Таким образом, применение разработанных методов позволит не только повысить оперативность и точность контроля, но и сократить эксплуатационные затраты за счет повышения качества возведения земляного полотна с учетом современных требований, а также минимизировать риски появления новых дефектных участков на вводимых в эксплуатацию линиях. Следует отметить, что оценка эффективности в денежной форме от непосредственного внедрения методик не производилась, так как определить притоки денежных средств от такой работы невозможно. Однако, как показано выше, потенциальный экономический

эффект от предотвращения строительства некачественных конструкций и снижения будущих ремонтных затрат является значительным.



## **4 КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

### **4.1 Изменение свойств грунтов при длительной эксплуатации железных дорог**

В процессе многолетней эксплуатации земляное полотно подвергается нагрузкам, обусловленным движением поездов, и воздействиям природно-климатических факторов [142–150]. При этом земляное полотно должно обеспечить надежность и долговечность функционирования железнодорожного пути, поскольку его ремонт является весьма дорогостоящим мероприятием. В связи с этим национальные нормативные документы, регламентирующие строительство земляного полотна, предусматривают жесткие требования к его деформативности на весь срок эксплуатации современных железных дорог.

Одним из способов решения этой проблемы на стадии расчетов земляного полотна и проектирования строительства может стать сочетание лабораторных циклических испытаний, усовершенствованного аналитического расчета и численного моделирования свойств конструкции, учитывающего изменение свойств ее элементов и строительных материалов под действием длительных воздействий поездов [151-158]. Важной задачей при проведении геотехнических расчетов является корректный выбор расчетной модели грунта, сформулированной в рамках теории пластического деформирования, а также ее параметров для получения картины напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового инженерного сооружения [50,159]. Кроме того, для применения сложных моделей грунта при численном моделировании требуется определить достаточно большое количество входных параметров, соответствующих физико-механическим свойствам грунтов и материалов. Вместе с этим для выполнения необходимых процедур верификации и валидации компьютерной модели и результатов расчетов необходимо осуществить физическое моделирование (масштабное или лабораторное) или натурные измерения (мониторинг).

## 4.2 Методика и условия проведения эксперимента. Этап № 1

### 4.2.1 Характеристики исследуемого грунта и подготовка образцов

Для решения данной задачи в условиях лаборатории необходимо учесть статический, циклический и динамический характер нагрузок и воздействий на земляное полотно железных дорог [160-164]. В данной главе диссертации выполнено лабораторное моделирование статического и циклического воздействия на грунт для определения величины накопления остаточных деформаций земляного полотна в зависимости от грузонапряженности на участках пути.

В качестве объекта исследования был выбран глинистый грунт. Его физико-механические свойства, определенные по стандартным методикам, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства исследуемого грунта

Наименование показателя	Значение	Нормативный документ
Плотность грунта $\rho_{\text{max}}$ , г/см <sup>3</sup>	1,66	ГОСТ 22733–2016
Влажность $W_{\text{опт}}$ , %	19,5	
Плотность частиц грунта $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2,76	ГОСТ 5180–2015
Коэффициент пористости $e$	0,66	
Удельное сцепление $c$ , кПа	60	ГОСТ 12248.3–2020
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	17	

### 4.2.2 Схема циклического нагружения-разгрузки и оборудование

Образцы грунта диаметром 87 мм и высотой 25 мм готовились методом статического прессования при оптимальной влажности до достижения требуемой плотности, соответствующей коэффициенту уплотнения  $K_{\text{упл}} = 0,93$  и 1,0. Контроль плотности осуществлялся путем взвешивания. В результате чего получали «образцы-близнецы» для проведения серии испытаний.

Испытания проводились на автоматизированной установке компрессионного сжатия, позволяющей программировать режимы нагружения-разгрузки. На

образец через штамп циклически подавалась нагрузка. Максимальное напряжение в цикле составляло 137 кПа (суммарная нагрузка от веса верхнего строения пути ~17 кПа и подвижного состава ~120 кПа [165]). Данная нагрузка соответствует осевой нагрузке от вагонов ~30 тс/ось, которая является перспективной величиной, а расчетное значение нагрузки от верхнего строения пути равнялось 17 кПа. Длительность приложения максимальной нагрузки составила 45 секунд, что соответствует проходу грузового состава длиной около 80 вагонов со скоростью 90 км/ч. Пауза между нагрузками (интервал между проходами поезда) составила 4,25 минуты. Общее число циклов испытаний составило 500. Регистрация деформаций грунта производилась автоматически после каждого цикла.

Результаты исследований после 500 циклов нагружения-разгрузки грунтового образца в виде графиков накопления остаточных деформаций двух образцов грунта, находящихся в максимально уплотненном и недоуплотненном состояниях, представлены на рисунке 4.1.

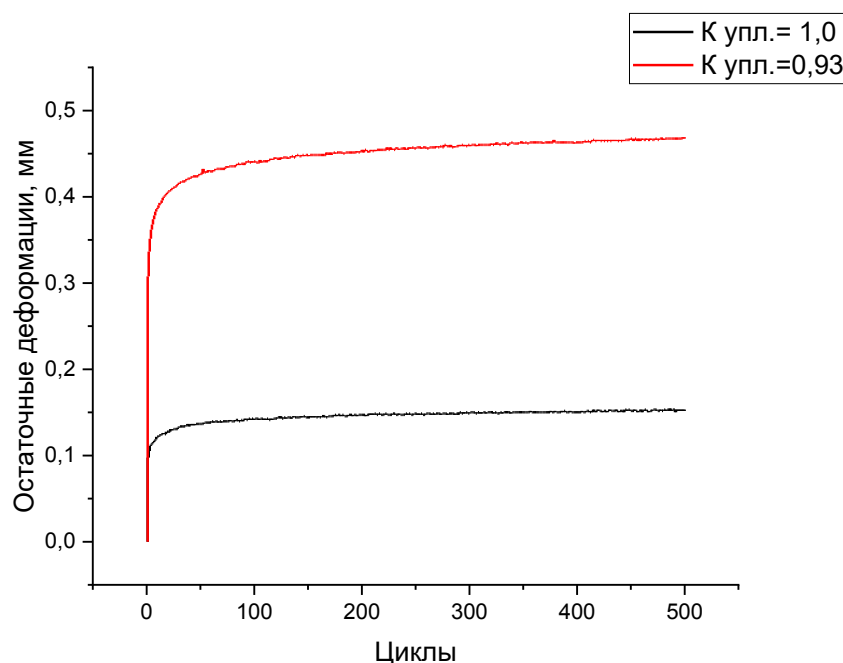


Рисунок 4.1 – Остаточные деформации образцов грунта с  $K_{упл} = 0,93$  и  $K_{упл} = 1,0$  при интервале между грузовыми поездами 4,25 мин

Из рисунка 4.1 видно, что деформации при  $K_{упл} = 0,93$  (остаточные составляют 0,54 мм и относительные 0,022) в три раза превышают деформации при  $K_{упл} = 1,0$  (остаточные – 0,18 мм и относительные 0,007).

В рамках данного исследования для решения поставленной задачи основное внимание было уделено анализу поведения недоуплотненного грунта ( $K_{упл} = 0,93$ ). Такой подход обусловлен следующими ключевыми практическими и научными факторами:

- как показывают циклические испытания (см. рисунок 4.1 и последующий анализ), деформативность грунта носит нелинейный характер. Даже незначительное снижение коэффициента уплотнения (всего на 7 % – с 1,0 до 0,93) приводит к непропорциональному росту остаточных деформаций;
- достижение равноупругого состояния тела насыпи как по глубине, так и вдоль строящегося участка с постоянным нормативным коэффициентом уплотнения является крайне сложной задачей;
- на практике, особенно на больших участках проведения работ, всегда встречаются локальные зоны с пониженным уплотнением из-за неоднородности грунта, ошибок в строительстве и существующих методов контроля плотности только лишь в локальных точках;
- для грунта с  $K_{упл} = 1,0$  деформации после 500 циклов скорее всего будут находиться в пределах допустимых значений. Однако для грунта с  $K_{упл} = 0,93$  величина деформации за такой же период воздействий может превышать нормативные значения, что свидетельствует о влиянии недоуплотнения грунта на стабильность земляного полотна и долговечность всей конструкции железнодорожного пути.

#### ***4.2.3 Определение осадки насыпи при статической нагрузке. Верификация модели грунта***

Перед началом проведения продолжительных циклических испытаний для определения перспективных осадок насыпи на длительный срок, необходимо выполнить верификацию подобранной модели грунта путем сопоставления расчетов компьютерного моделирования и аналитического расчета. В качестве расчетной модели для проведения исследования принята однопутная насыпь высотой 12 м, сложенная из глинистых грунтов с уплотнением до  $K_{упл} = 0,93$ , на

которую воздействует поездная нагрузка интенсивностью 120 кПа. Для определения характеристик грунта насыпи были проведены стандартные компрессионные испытания в одометре. По результатам испытаний была построена компрессионная кривая (рисунок 4.2).

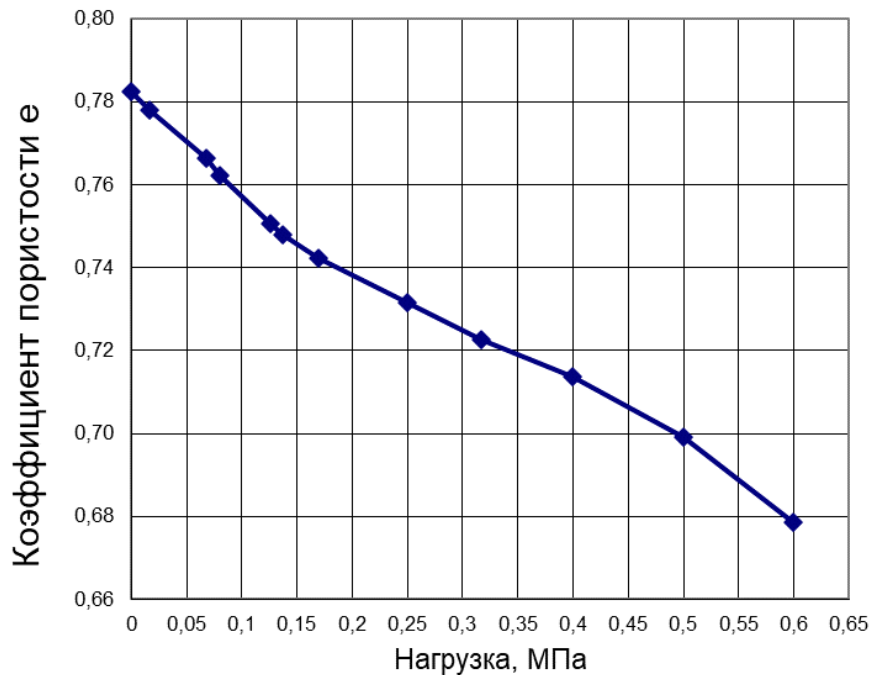


Рисунок 4.2 – Компрессионная кривая зависимости коэффициента пористости от нагрузки  $e = f(\sigma)$

Перед непосредственным расчетом величины осадки было определено напряженное состояние тела насыпи (рисунок 4.3), сформировавшееся от статической (постоянно действующей) нагрузки ( $\sigma_{ст}$ ), от поездной (временной) нагрузки ( $\sigma_{п}$ ) и суммарной нагрузки  $\sigma_{сумм} = \sigma_{ст} + \sigma_{п}$ .

Аналитический расчет осадки от поездной нагрузки был выполнен методом послойного суммирования на основе теории компрессионного сжатия, суть которого заключается в следующем:

1. Насыпь разделяется на несколько слоев определенной толщины, и для каждого слоя определяются свои значения модуля деформации в интервале напряжений для этого слоя. Это подход позволяет учесть нелинейное изменение деформационных характеристик грунта по глубине.

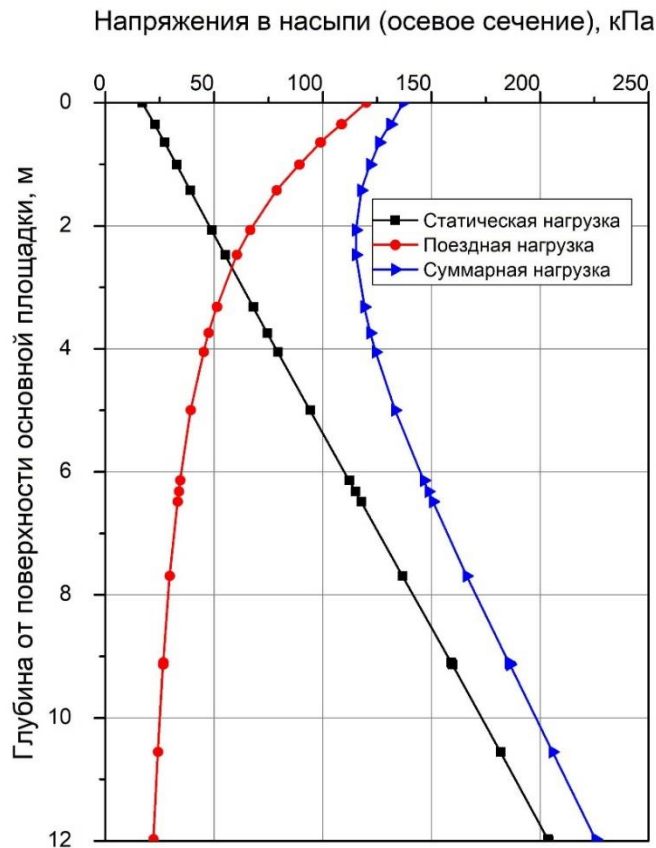


Рисунок 4.3 – Эпюры распределения напряжений в насыпи по глубине

2. Для каждого  $i$ -го слоя определяется природное (начальное) напряжение от статического веса вышележащих слоев –  $\sigma_{ст}i$  и дополнительное вертикальное напряжение  $\sigma_{п}i$ , вызванное циклической нагрузкой от поезда. При этом суммарное напряжение в слое составляет  $\sigma_{сумм}i = \sigma_{ст}i + \sigma_{п}i$ .

3. По компрессионной кривой для каждого слоя определяются значения коэффициента пористости:  $e_{пр}i$ , соответствующее давлению  $\sigma_{п}i$ ;  $e_{сумм}$  – соответствующее суммарному давлению  $\sigma_{сумм}i$ .

4. Относительная деформация  $i$ -го слоя вычисляется по формуле:

$$\varepsilon i = (e_{пр}i - e_{сумм}) / (1 + e_{пр}i).$$

5. Абсолютная осадка каждого слоя рассчитывается как:

$$Si = \varepsilon i \cdot hi,$$

где  $hi$  – толщина слоя, м.

6. Суммарная расчетная осадка определяется как сумма осадок всех отдельных слоев:  $S = \sum Si$ .

Для получения более детальной картины напряженно-деформированного состояния (НДС), а также для учета пространственной работы конструкции и взаимодействия между слоями грунта, которое не учитывается в классическом послойном суммировании, был выполнен расчет методом конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе Plaxis 2D. Построена плоская модель насыпи земляного полотна. Геометрия модели включала верхнее строение пути, тело насыпи высотой 12 м. Основание земляного полотна принято недеформируемым, т. к. расчет выполнялся только в теле насыпи. Величина поездной нагрузки задавалась таким образом, что на основной площадке создавалось напряжение 120 кПа. Для данной задачи, несмотря на наличие в Plaxis более сложных и современных моделей (например, Hardening Soil, HS-small), выбрана линейно-упруго-идеальнопластичная модель грунта с критерием прочности Мора – Кулона (Mohr-Coulomb). Данный выбор был обоснован тем, что все необходимые параметры модели (модуль деформации  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , угол внутреннего трения  $\phi$ , сцепление  $c$ ) были определены в ходе стандартных лабораторных испытаний и не требовали проведения дополнительных сложных экспериментов. Для более сложных моделей (например, Hardening Soil) требуется определение 10–12 параметров, многие из которых (например, такие как  $E_{50}$ ,  $E_{ur}$ ,  $E_{oed}$ ,  $m$ ) требуют проведения сложных, трудоемких и более длительных испытаний в условиях осесимметричного нагружения с использованием стабилометров.

Полученные результаты осадки земляного полотна представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Величина осадки насыпи высотой 12 м

Вид нагрузки	Осадка, см	
	Аналитический расчет	Компьютерное моделирование
Статическая и поездная нагрузка	23,4	22,38
Статическая нагрузка	16,5	14,08
Нагрузка от поезда	6,9	8,3

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует эффективность комплексного подхода. Численное моделирование в Plaxis 2D по модели Мора – Кулона успешно верифицировано классическим аналитическим расчетом послойного суммирования на основе теории компрессионного сжатия. Их взаимное соответствие доказывает адекватность принятых расчетных схем, корректность определения полей напряжений и характеристик грунта, что является основанием для использования полученных результатов в дальнейшей работе.

#### **4.3 Этап № 2. Определение эпюры затухания нагрузок в насыпи и план циклических испытаний**

Для насыпи, описанной выше, в характерных точках по глубине (см. рисунок 4.2) были определены минимальные и максимальные напряжения (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Диапазоны циклических напряжений на разных глубинах

<b>Глубина от уровня основной площадки, м</b>	<b>Напряжение от статической нагрузки, кПа</b>	<b>Суммарное напряжение (статика + поезд), кПа</b>	<b>Амплитуда напряжений (поездная нагрузка), кПа</b>
0,35	22	134	112
1,0	32	122	90
2,0	49	116	67
4,0	79	124	45
8,0	142	171	29
12,0	204	226	22

На основе этих данных была проведена вторая серия испытаний. Были подготовлены образцы с  $K_{упл} = 0,93$ , которые в условиях компрессионного сжатия были подвергнуты циклическому режиму нагружения-разгрузки в количестве 500 циклов. Диапазон нагрузок от минимального до максимального напряжения соответствовал воздействию поездной нагрузки на заданной глубине (см. таблицу 4.3).

Результаты циклических компрессионных испытаний представлены на рисунке 4.4.



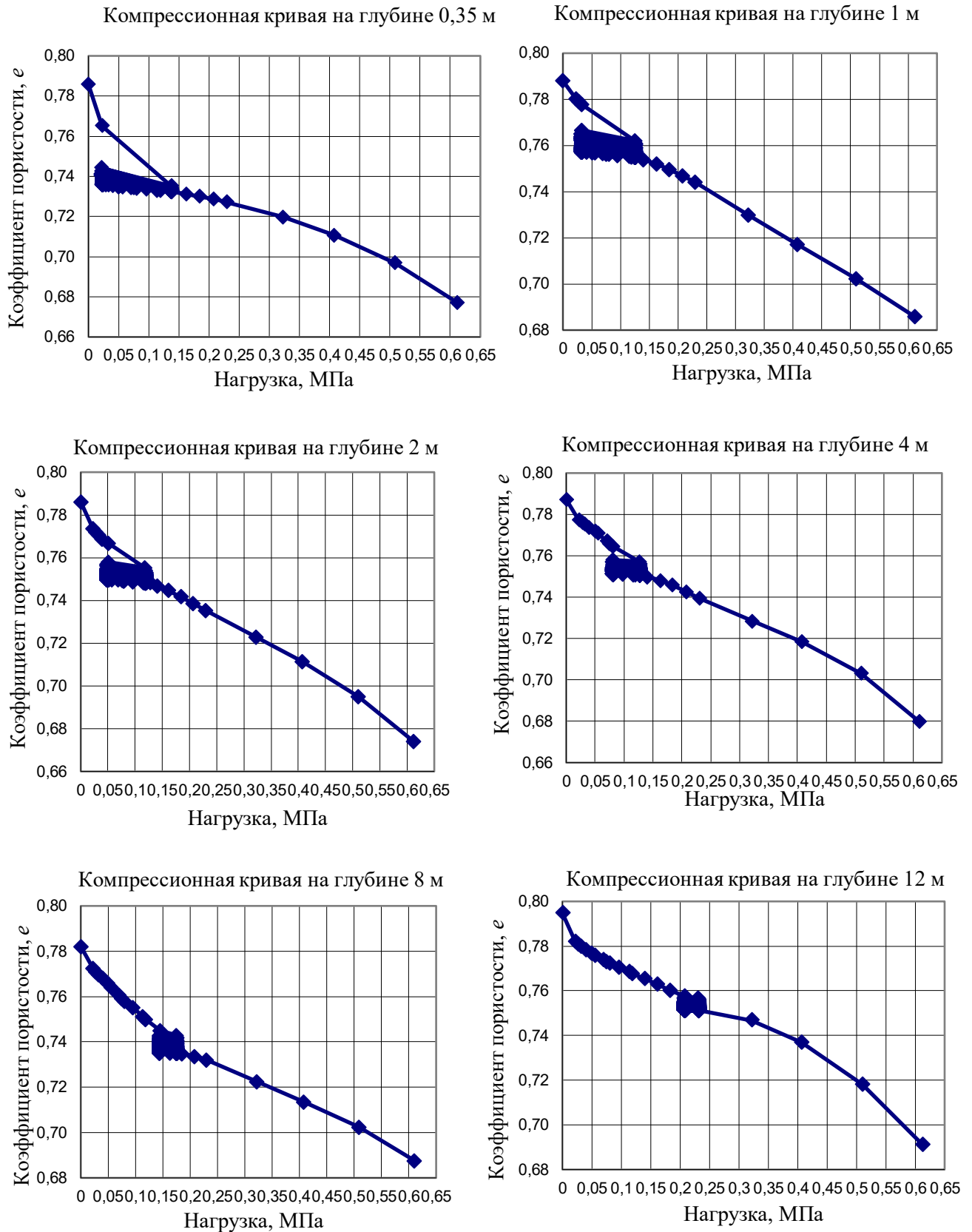


Рисунок 4.4 – Зависимости коэффициента пористости от нагрузки при циклических компрессионных испытаниях образцов грунта с  $K_{упл} = 0,93$

**4.3.1 Обработка результатов измерений после 500 циклов испытаний.**  
**Аналитический расчета деформаций (метод послойного суммирования)**  
**и компьютерное моделирование**

Для прогноза накопления остаточных деформаций в теле насыпи за период, эквивалентный 500 циклам нагружения-разгрузки под действием поездов, был выполнен аналитический расчет методом послойного суммирования, описанный в п. 4.2.3. Ключевой особенностью расчета являлся учет циклического характера нагрузки.

Насыпь высотой 12 м была разделена на расчетные слои, соответствующие характерным глубинам, представленным в таблице 4.3. Для каждого слоя на основе результатов циклических компрессионных испытаний (см. рисунок 4.3) определялось изменение коэффициента пористости не только под действием статического нагружения, но и вследствие его уплотнения при циклическом поездном воздействии. По кривой циклического нагружения-разгрузки (рисунок 4.5) для соответствующего диапазона напряжений, которые принимались для каждого принятого расчетного слоя по высоте насыпи, фиксировалась величина остаточной деформации после 500 циклов (см. рисунок 4.5).

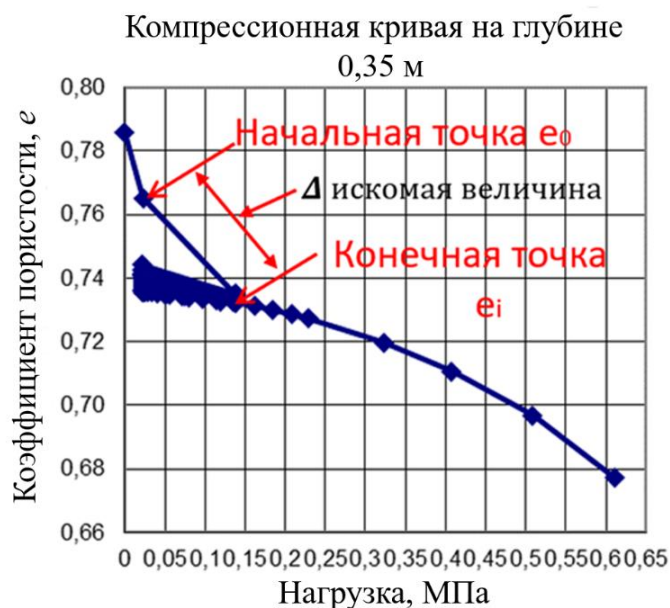


Рисунок 4.5 – Пример выбора необходимых точек на компрессионной кривой для определения относительной деформации расчетного грунтового слоя

Вместе с этим было выполнено численное моделирование в Plaxis 2D с использованием модели грунта Мора – Кулона (рисунок 4.6). Следует отметить, что для каждого слоя насыпи были определены отдельные расчетные модули деформации для соответствующих диапазонов напряжений.

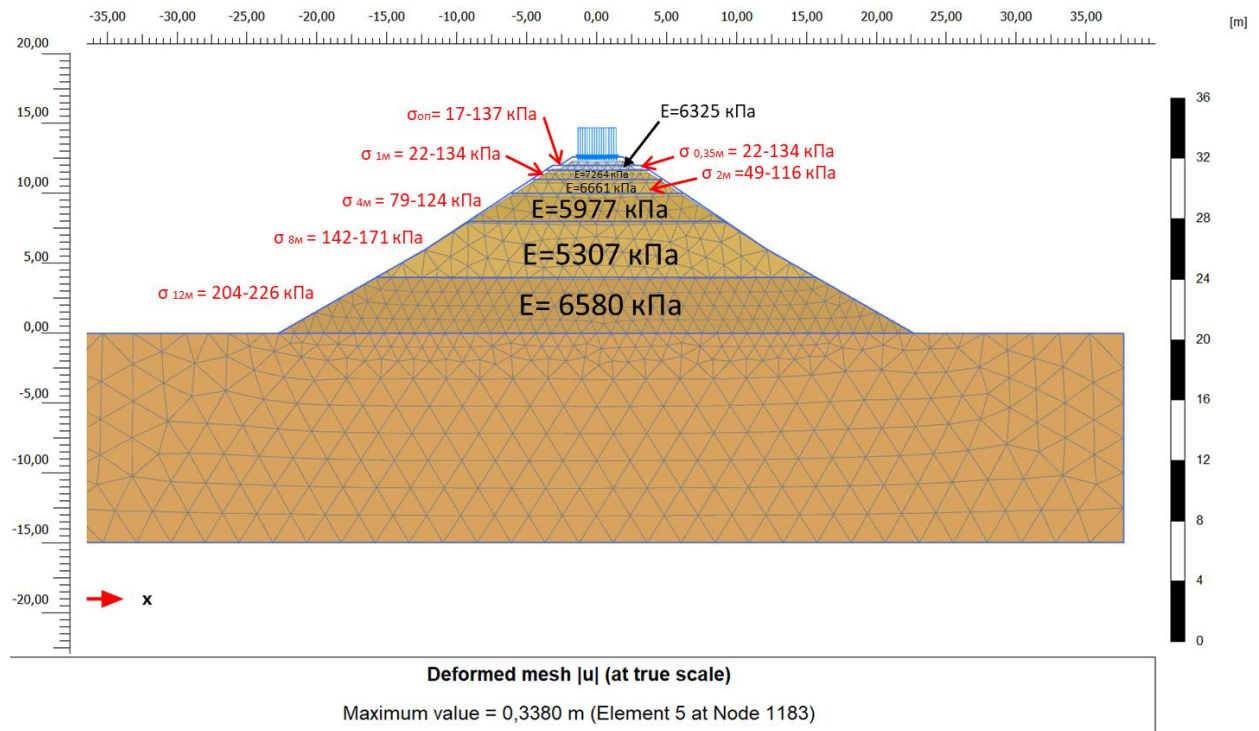


Рисунок 4.6 – Расчетная модель насыпи

Сравнение результатов, полученных аналитическим и численным методами, показало их хорошую сходимость (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Величина осадки насыпи высотой 12 м после 500 циклов нагружения-разгрузки

Вид нагрузки	Осадка, см	
	Аналитический расчет	Компьютерное моделирование
Статическая и поездная нагрузка	35,55	33,8
Статическая нагрузка	24,84	22,76
Нагрузка от поезда	10,72	11,04

Близкое совпадение результатов для осадки насыпи от поездной нагрузки (расхождение  $\sim 2,9\%$ ) и суммарной осадки ( $\sim 5,0\%$ ) свидетельствует о корректной калибровке модели грунта и успешной верификации численной модели. Данное соответствие результатов подтверждает адекватность принятой расчетной модели и корректность определения параметров грунта, что позволяет использовать разработанный методический подход для прогнозирования деформаций земляного полотна на перспективный период эксплуатации.

#### **4.4 Этап № 3. Прогнозирование накопления осадок насыпи на длительный срок**

Прогнозирование накопления остаточных деформаций земляного полотна является ключевой задачей для обеспечения надежности конструкции и долговременной стабильности земляного полотна, своевременного планирования ремонтов. На данном этапе исследования был выполнен комплексный прогноз развития осадок 12-метровой насыпи на период около 11 лет с учетом интенсивности движения в количестве 50 пар поездов в сутки.

##### ***4.4.1 Методика прогнозирования и аппроксимации экспериментальных данных***

Для математического описания динамики накопления относительной деформации ( $\varepsilon$ ) от количества циклов нагружения ( $N$ ) для каждого расчетного слоя была применена комбинация в виде суммы трех экспоненциальных функций (рисунок 4.7):

$$\varepsilon(N) = A_1 \cdot e^{-N/t_1} + A_2 \cdot e^{-N/t_2} + A_3 \cdot e^{-N/t_3} + \varepsilon_0, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon(N)$  – относительная деформация после  $N$  циклов нагружения-разгрузки;  
 $A_1, A_2, A_3, t_1, t_2, t_3, \varepsilon_0$  – параметры аппроксимационной функции;  
 $N$  – количество циклов нагружения-разгрузки.

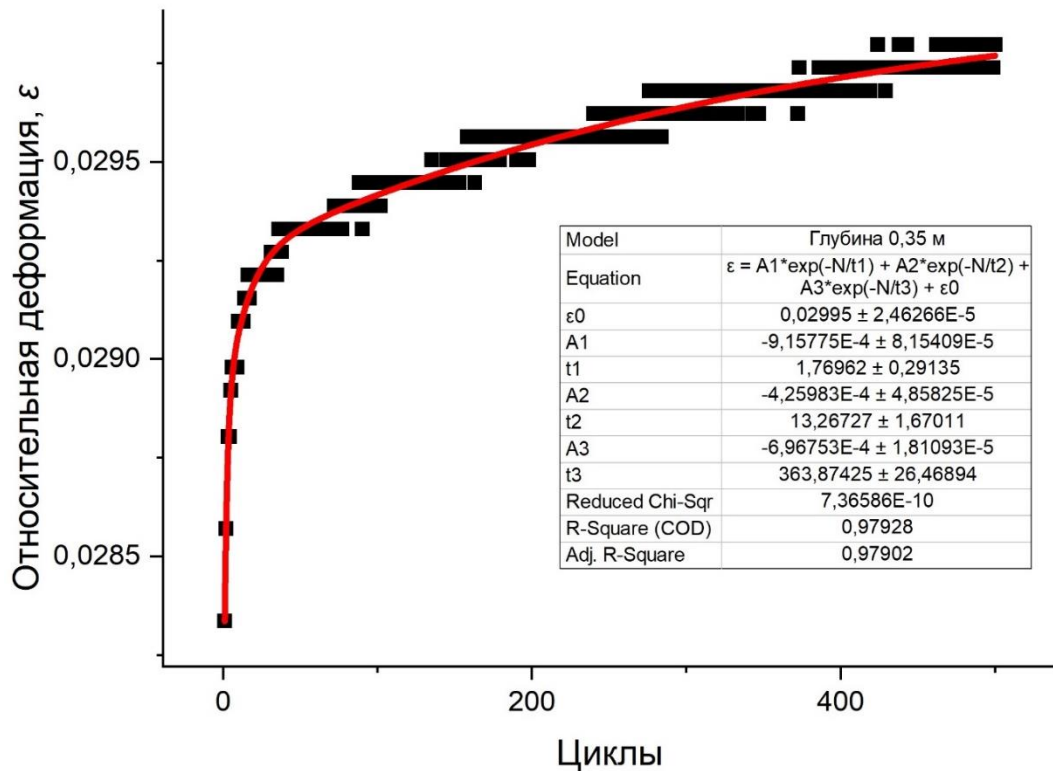


Рисунок 4.7 – Аппроксимация экспериментальных данных зависимости относительной деформации образцов грунта от числа циклов для глубины расчетного слоя 0,35 м

На основе обработки экспериментальных данных циклических испытаний для каждого характерного слоя насыпи были определены параметры аппроксимирующей функции, которые представлены в таблице 4.5.

Как видно из таблицы 4.5, для всех расчетных слоев была достигнута высокая точность аппроксимации экспериментальных данных, о чем свидетельствуют значения коэффициента детерминации  $R^2$ , находящиеся в диапазоне от 0,979 до 0,999.

Затем были сопоставлены результаты аналитического расчета и математического эксперимента с использованием аппроксимационной кривой и компьютерного моделирования для 500 циклов нагружения-разгрузки. Результаты представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.5 – Параметры аппроксимирующих функций для различных глубин расчетных слоев насыпи

Глубина от поверхности ОП, м	$\varepsilon_0$	$A_1$	$t_1$	$A_2$	$t_2$	$A_3$	$t_3$	$R^2$
0,35	0,02995±2,46E-5	–9,16E-4±8,15E-5	1,77±0,29	–4,26E-4±4,86E-5	13,27±1,67	–6,97E-4±1,81E-5	363,87±26,47	0,979
1,0	0,01867±3,79E-5	–0,00231±6,09E-5	2,55±0,11	–0,0011±2,53E-5	32,74±1,65	–0,00143±1,67E-5	333,14±22,29	0,996
2,0	0,02133±3,49E-5	–0,00216±5,52E-5	2,76± 0,13	–0,00113±2,54E-5	30,67±1,49	–0,00137±1,60E-5	331,17±21,23	0,996
4,0	0,02085±4,24E-5	–0,00184±5,32E-5	3,02±0,16	–0,00105±2,68E-5	32,95±1,86	–0,00165±1,96E-5	347,08±21,86	0,997
8,0	0,02684±3,26E-5	–0,00163±3,93E-5	3,71±0,18	–0,00134±2,51E-5	31,93±1,27	–0,00217±1,45E-5	337,25±12,73	0,999
12,0	0,02473±4,30E-5	–8,34E-4±3,75E-5	5,15±0,46	–0,00103±2,88E-5	38,08±2,44	–0,00186±1,64E-5	348,22±20,57	0,998

Таблица 4.6 – Сравнение осадки насыпи после 500 циклов, рассчитанной по компрессионной кривой и по аппроксимационной кривой

Способ расчета	Осадка, см		
	Статическая и поездная нагрузка	Статическая нагрузка	Нагрузка от поезда
Аналитический расчет 500 циклов	35,55	24,84	10,72
Аналитический расчет 500 циклов по данным аппроксимационной кривой	35,59	24,84	10,75
Компьютерное моделирование 500 циклов	33,8	22,76	11,04
Компьютерное моделирование 500 циклов по данным аппроксимационной кривой	33,2	22,25	10,95

Как видно из таблицы 4.6, при прогнозе осадки для 500 циклов подобранная функция демонстрирует хорошую сходимость с данными лабораторных испытаний.

Для сравнения результатов расчета накопления остаточных деформаций по рассмотренным выше методикам была проанализирована рабочая документация на проект капитального ремонта и реконструкции железнодорожного участка перегона Васильево-Петровская – Орловка-Кубанская (нечетный путь) Северо-Кавказской железной дороги. Средняя осадка основной площадки по участку ремонта с сентября 2012 г. по декабрь 2023 составила 12 см. Интенсивность движения по нечетному пути составляет около 50 пар поездов в сутки.

Таким образом, число циклов за данный период составляет:

$$N_{\text{год}} = 50 \text{ пар/сутки} \times 4139 \text{ дней} = 206\,950 \text{ циклов.}$$

Рассчитанные значения относительных деформаций для каждого слоя после 206 950 циклов были использованы в методе послойного суммирования для определения абсолютных осадок. Параллельно было выполнено численное моделирование в Plaxis 2D.

Результаты прогноза осадки с сентября 2012 г. по декабрь 2023 г. эксплуатации сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнительные результаты прогноза осадки насыпи  
с сентября 2012 г. по декабрь 2023 г. на участке  
Васильево-Петровская – Орловка-Кубанская

Вид нагрузки	Аналитический расчет, см	Компьютерное моделирование, см	Реальная осадка, см
Статическая + поездная	36,77	35,26	12
Статическая	24,84	23,85	–
Поездная	11,93	11,41	–

Из данных таблицы 4.7 видно, что насыпь эксплуатируемого железнодорожного участка Васильево-Петровская – Орловка-Кубанская, уплотненная предположительно с нормативным  $K_{\text{упл}} = 1,0$ , консолидированная и

набравшая бытовое состояние, имеет осадку основной площадки в 3 раза меньше, чем прогнозируемая в результате аналитического расчета и компьютерного моделирования с  $K_{\text{упл}} = 0,93$ , что, в свою очередь, хорошо согласуется с данными рисунка 4.1.

#### 4.5 Общий вывод по главе

Предложен и апробирован метод прогноза накопления остаточных деформаций грунтов земляного полотна, основанный на проведении серии циклических компрессионных испытаний в режиме нагружения-разгрузки в интервалах давлений, соответствующих работе грунта в заданных расчетных сечениях по глубине и при подборе аппроксимирующей функции (например, из трех экспоненциальных) для оценки величины деформации на длительный срок эксплуатации.

Расхождение между результатами аналитического расчета и численного моделирования при прогнозировании воздействий на земляное полотно проезда 206 950 шт. поездов не превышает 4,4 %, что подтверждает адекватность подбора аппроксимационной функции, определения параметров грунта и подобранной модели грунта. Комплексный подход, сочетающий аппроксимацию результатов лабораторных циклических компрессионных испытаний, аналитический расчет и численное моделирование, позволяет с высокой достоверностью прогнозировать величину накопления остаточных деформаций земляного полотна на долгосрочную перспективу.

Полученные результаты доказывают, что отступление величины коэффициента уплотнения грунта от проектного значения повышает вероятность проявления осадок земляного полотна при его эксплуатации. Поэтому обеспечение требуемого коэффициента уплотнения грунта при неукоснительном соблюдении технологии производства работ является обязательным условием для соблюдения нормативных требований по деформативности земляного полотна и обеспечения долговременной стабильности железнодорожного пути.



Разработанная методика может быть рекомендована для использования при проектировании новых и реконструкции существующих железнодорожных линий для прогнозирования накопления деформации, разработки противодеформационных мероприятий и планирования ремонтов и усиления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Устранены ограничения и расширены возможности резонансного метода за счет верификации измеряемых значений диэлектрической проницаемости грунтов в области экстраполяции независимым радиоволновым методом в частотном диапазоне 1400–1700 МГц с целью повышения точности георадиолокационной диагностики грунтов земляного полотна и оперативной оценки влажности. Разработано и апробировано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс обработки и получения значений диэлектрической проницаемости по измеренному значению резонансной частоты.

2. Предложен и апробирован метод обработки инфракрасных спектров для определения влажности грунтов. Применение предложенного подхода дополняет резонансный метод по определению диэлектрической проницаемости и влажности грунта, позволяя проводить измерения до значений влажности, близких к границе текучести.

3. Разработан и апробирован экспресс-метод полуколичественного анализа состава грунтов по результатам обработки инфракрасных спектров. Реализованная в диссертационной работе численная процедура позволяет определять состав грунта близкого минерального состава с точностью 10 %, что делает возможным повышение качества входного контроля, своевременное внесение изменений в проект, а также позволяет избежать логистических ошибок при организации строительства.

4. Установлена высокая степень корреляционной связи (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,99$ ) спектральных характеристик грунта с концентрацией модифицирующих добавок. В результате экспериментальных исследований определена зависимость остаточной деформации модифицированного грунта разной степени загипсованности от приложенной вертикальной нагрузки, а также спектральных особенностей полос ИК-спектров. Построены феноменологические

уравнения, связывающие интенсивность полос ИК-спектра с концентрацией внесенного модификатора, а также прочностные характеристики глинистых грунтов с характеристиками, учитывающими атомные свойства составляющих грунты минералов.

5. Микрофотографические исследования свойств базальных поверхностей глинистых частиц в смеси бентонита и гипса позволили установить концентрацию и распределение частиц гипса на глинистых частицах при различной пробоподготовке образцов, что позволяет контролировать равномерность распределения модификаторов в грунте.

6. Предложены подходы к развитию метода георадиолокации, заключающиеся в применении разработанной технологии предварительной процедуры тарирования георадиолокационной аппаратуры и получения количественных результатов: показатель преломления и влажность грунтового слоя с использованием заранее установленной корреляционной зависимости, а также распределение влажности в конструкционном слое в реальном времени. Внедрение данной технологии позволит оперативно управлять технологическими процессами строительства и ремонта железнодорожного пути, отвечающими за достижение нормативных показателей степени уплотнения грунтов.

7. Разработан метод, позволяющий контролировать процесс дренирования воды в пористых грунтовых слоях, а также рассчитать глубину расположения наиболее увлажненного грунтового слоя. Метод базируется на вычислении по радарограммам отражательной способности конструктивных слоев и ее производной по глубине. Внедрение разработанного метода в технологию увлажнения дренирующих грунтов при их подготовке к уплотнению позволит повысить качество строительства земляного полотна железных дорог.

8. В результате исследований установлено, что в глинистых грунтах относительная диэлектрическая проницаемость и коэффициент затухания достаточно чувствительны к влажности и концентрации гипса. Кроме того, уменьшение глубинности георадиолокационных измерений, где естественная

влажность близка к нулю или составляет не более 15 %, может объясняться влиянием эффекта Максвелла–Вагнера.

9. В ходе экспериментальных лабораторных исследований установлено, что снижение степени уплотнения всего на 7 % приводит к увеличению остаточных деформаций в 3 раза.

10. Разработан комплексный подход, основанный на результатах циклических компрессионных испытаний и компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтов, позволяющий прогнозировать накопление остаточных деформаций земляного полотна на длительный срок эксплуатации.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации:

1. Внедрение разработанных методик в практику экспресс-оценки характеристик грунтов при строительстве, ремонтах и текущем содержании.

2. Разработка нормативного документа, регламентирующего проведение контроля качества сооружения железнодорожного земляного полотна.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Указ Президента РФ от 16.03.2010 № 321 «О мерах по организации движения высокоскоростного железнодорожного транспорта в РФ». – Текст : электронный // ГАРАНТ. Информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/197716/?ysclid=mgm5ar05hz861006897> (дата обращения: 10.10.2025).

2. Грузовой железнодорожный транспорт России в 2010–2015 гг.: аналитический / Институт проблем естественных монополий. – Май 2016. – 31 с. – Текст : электронный. – URL: [https://depo-magazine.com/netcat\\_files/File/2016\\_05\\_25\\_analiticheskiy\\_doklad\\_po\\_zhd\\_transportu\\_2010\\_2015.pdf?ysclid=mgm5fi89fl448275365](https://depo-magazine.com/netcat_files/File/2016_05_25_analiticheskiy_doklad_po_zhd_transportu_2010_2015.pdf?ysclid=mgm5fi89fl448275365) (дата обращения: 10.10.2025).

3. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года : утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17.06.2008 № 877-р. – Текст : электронный // КонсультантПлюс. Справочно-правовая система. – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_92060/4fa0a1723fc315e72f8bd97e119a1101f59ac132](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_92060/4fa0a1723fc315e72f8bd97e119a1101f59ac132) (дата обращения: 10.10.2025).

4. Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 31.07.2025). Статья 48.1. Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты : введена Федеральным законом от 18.12.2006 № 232-ФЗ. – Текст : электронный // СПС «КонсультантПлюс». – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/020268898fa86a2e82a7b360986eb212b02482cf](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/020268898fa86a2e82a7b360986eb212b02482cf) (дата обращения: 10.10.2025).

5. Контроль плотности грунтов земляного полотна методом георадиолокации / В. Л. Шаповалов, М. В. Окост, В. А. Явна, А. В. Морозов, А. А. Васильченко // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 7–13. – ISSN 0131-5765.

6. GPR evaluation of homogeneity of soil properties in linear objects / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, V. A. Yavna, A. A. Vasilchenko // 15<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 582–592. – DOI 10.3997/2214-4609.201901754.

7. Георадиолокационный метод диагностики грунтов при строительстве земляного полотна / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, А. А. Васильченко, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 4 (72). – С. 120–127. – ISSN 0201-727X.

8. Морозов, А. В. Мониторинг изменения влажности песчаных конструктивных слоев методом СВЧ-зондирования / А. В. Морозов, А. А. Васильченко, В. А. Попов // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк-2019) : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения посвящается. Т. 1 : Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 138–142. – ISBN 978-5-88814-994-2.

9. GPR-based moisture content determination in the ground construction layers during the construction of subgrades / V. L. Shapovalov, M. V. Okost, A. A. Vasilchenko, V. A. Yavna // 15<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2019. – Gelendzhik, 2019. – P. 124–130. – DOI 10.3997/2214-4609.201901698.

10. Исследования дренирующих свойств несвязных грунтов методами СВЧ / А. В. Морозов, А. А. Васильченко, Д. В. Ольховатов, И. А. Кондрашов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 277-281.

11. GPR method for studying the drainage properties of sand layers [Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песчаных слоев] / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, A. A. Vasilchenko, M. V. Okost, V. A. Yavna // 16<sup>th</sup> Engineering and Mining Geophysics 2020. – Perm, 2020. – P. 95. – DOI 10.3997/2214-4609.202051119.

12. GPR calibration for determining the electrophysical properties of soil structural layers [Тарировка георадаров для определения электрофизических свойств грунтовых конструктивных слоев] / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, A. A.

Vasilchenko [et al.] // 16<sup>th</sup> Engineering and Mining Geophysics 2020. – Perm, 2020. – P. 94. – DOI 10.3997/2214-4609.202051118.

13. Vasilchenko, A. A. GPR method for studying the drainage properties of sands [Георадиолокационный метод исследования дренирующих свойств песков] / A. A. Vasilchenko // 17<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2021. – Gelendzhik, 2021. – P. 48. – DOI 10.3997/2214-4609.202152056.

14. Ground-penetrating radar method for studying water drainage in sand layers / V. L. Shapovalov, A. A. Vasilchenko, V. A. Yavna [et al.] // Fluids. – 2022. – No. 7 (12). – P. 379. – DOI 10.3390/fluids7120379.

15. The moisture uniformity control of the draining soil layers in the roadbed construction. / V. Yavna, V. Shapovalov, A. Vasilchenko, A. Morozov // International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021. – Novosibirsk, 2021. – Vol. 2. – P. 481–490. – DOI 10.1007/978-3-030-96383-5\_54.

16. Применение методов компьютерного моделирования при прогнозе надежности строящегося земляного полотна железных дорог / В. Л. Шаповалов, А. А. Васильченко, М. В. Окост, А. В. Морозов, В. А. Явна // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 2 : Технические науки. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 367–371. – ISBN 978-5-907295-13-1.

17. Оценка влияния характеристик грунтов земляного полотна на его устойчивость / В. Л. Шаповалов, А. А. Васильченко, М. В. Окост, В. А. Явна // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 364–368. – ISBN 978-5-907295-40-7.

18. Electrophysical properties of bentonite and kaolin depending on salinity and temperature [Электрофизические свойства бентонита и каолина в зависимости от засоленности и температуры] / V. A. Yavna, S. N. Sulavko, A. G. Kochur, A. A. Vasilchenko, P. Daniel // Engineering and Mining Geophysics. – Perm, 2020. – P. 93. – DOI 10.3997/2214-4609.202051117.

19. Electrophysical properties of sand-water mixtures in various phase states [Электрофизические свойства песочно-водной смеси в различных фазовых состояниях] / V. A. Yavna, S. N. Sulavko, A. G. Kochur, A. A. Vasilchenko, P. Daniel // Engineering and Mining Geophysics. – Perm, 2020. – P. 92. – DOI 10.3997/2214-4609.202051116.

20. Express method for determining the composition of soils based on IR spectroscopy technology / A. Morozov, A. A. Vasilchenko, A. S. Kasprzhitskii [et al.] // Vibrational Spectroscopy. – 2021. – Vol. 114. – Article no. 103258. – DOI 10.1016/j.vibspec.2021.103258.

21. Обоснование выбора исходных данных для компьютерного моделирования деформативности грунтов земляного полотна железных дорог / А. В. Морозов, А. А. Васильченко, В. Л. Шаповалов, В. А. Явна // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Т. 1 : Технические науки. – Ростов-на-Дону, 2021. – С. 317–321. – ISBN 978-5-907295-40-7.

22. Геотехнические свойства песков, использованных при строительстве земляного полотна железных дорог в Азово-Черноморском регионе / М. В. Окост, В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, А. А. Васильченко, В. А. Явна // Инженерная геология. – 2022. – Т. 17, № 3. – С. 18–28. – DOI 10.25296/1993-5056-2022-17-3-18-28.

23. Geotechnical properties of cohesive soils used in the construction of subgrade for the development of the railways in the Azov-Black Sea region / M. Okost, V. Shapovalov, A. Morozov, A. Vasilchenko, A. Kochur, V. Yavna // International Journal of Transportation Science and Technology. – 2024. – Vol. 4, June. – P. 237–257. – DOI 10.1016/j.ijtst.2023.05.003.

24. Шаповалов В. Л. Изменение микроструктурных характеристик глинистых грунтов при воздействии нагрузок / В. Л. Шаповалов, А. А. Васильченко, В. В. Архипов // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2022. – С. 374–378.



25. GPR method for continuous monitoring of compaction during the construction of railways subgrade / V. Shapovalov, A. Vasilchenko, V. Yavna, A. Kochur // Journal of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 199. – Article no. 104608. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2022.104608.

26. Явна, В. А. Многопараметрический статистический анализ показателей грунтовых материалов, используемых в строительстве земляного полотна / В. А. Явна, А. В. Морозов, А. А. Васильченко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2022. – С. 379–383.

27. Dielectric properties of heterogeneous mineral compositions based on bentonite and gypsum / A. Morozov, A Vasilchenko, V. Shapovalov, A. Kochur, V. Yavna V. // Transportation Research Procedia : collection of materials XIII International Conference on Transport Infrastructure: Territory Development and Sustainability. – Krasnoyarsk, 2023. – P. 947–954.

28. Исследование остаточных деформаций грунта при циклических нагрузках в условиях осесимметричного нагружения / М. В. Окост, А. А. Васильченко, М. П. Коршунов, С. С. Игнатенко // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 51–55.

29. Окост, М. В. Исследование прочностных характеристик глинистого грунта в лабораторных условиях при моделировании поездного воздействия / М. В. Окост, А. А. Васильченко, А. В. Морозов // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России (ТрансПромЭк-2024) : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Ростовского государственного университета путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 201–205.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2020666996. Программа обработки георадиолокационного разреза увлажненного конструкционного слоя из дренирующих грунтов / В. А. Явна, В. Л.

Шаповалов, А. А. Васильченко [и др.]. – № 2020661431 ; заявл. 01.10.2020 ; опубл. 18.12.2020.

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021665157. Программа для контроля уплотнения грунтов при строительстве земляного полотна по данным георадиолокационного обследования» / В. А. Явна, В. Л. Шаповалов, А. А. Васильченко [и др.]. – № 2021664358 ; заявл. 13.09.2021 ; опубл. 21.09.2021.

32. TB10621-2014 Code for design of high-speed railway. National Railway Administration of PRC (NRAPRC). – Beijing, China : China Railway Publishing House, 2015. – 329 p.

33. Lawrence, M. China's High-Speed Rail Development (International Development in Focus) / M. Lawrence, R. Bullock, Z. Liu. – Washington, DC : World Bank, 2019. – 98 p.

34. RIL 836 Earthworks and geotechnical structures design, build and maintainance. – Frankfurt am Main, Germany : DB Netze AG, 2014. – 530 p.

35. Technical Reference LGV as part of PPP or DSP. Vol. 2 : Earthworks. – Saint-Denis, France : Réseau ferré de France, 2010. – 76 p.

36. California High-Speed Train Project. TECHNICAL MEMORANDUM. Earthwork and Track Bed Design Guidelines TM 2.6.7, 2009. – 46 p.

37. Alamaa, A. High-speed railway embankments – a comparison of different regulations. Master Thesis / Angelica Alama ; Department of Civil and Architectural Engineering Division of Soil and Rock Mechanics KTH Royal Institute of Technology Stockholm. – Stockholm, 2016. – 73 p.

38. Zhou, S. Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area / S. Zhou, B. Wang, Y. Shan // Railway Engineering Science. – 2020. – No. 28. – P. 129–145. – DOI 10.1007/s40534-020-00214-x.

39. Chen, R. Recent Research on the Track-Subgrade of High-Speed Railways / R. Chen, J. ChDOI:10.1007/978-981-10-5610-9\_14en, H. Wang // In book : China's High-Speed Rail Technology. – 2018. – P. 243–249. – DOI 10.1007/978-981-10-5610-9\_14.

40. ТР 145-03. Технические рекомендации по производству земляных работ в дорожном строительстве, при устройстве подземных инженерных сетей, при обратной засыпке котлованов, траншей, пазух. – Москва : ГУП «НИИМосстрой», 2004. – 79 с.

41. СП 32-104-98. Проектирование земляного полотна железных дорог колеи 1520 мм : издание официальное : введены 01.01.1999. – Москва : Госстрой России ГУП ЦПП, 1999. – 90 с.

42. Пособие по технологии сооружения земляного полотна железных дорог (в развитие СНиП 3.06.02-86). – Москва : ПКТИтрансстрой, 1993. – 269 с.

43. СП 78.13330.2012. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменением № 1). утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 272 и введен в действие с 1 июля 2013 г. – Москва : Минрегион России, 2013. – 67 с.

44. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 : утвержден и введен в действие с 1 июля 2017 г. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1033/пр. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 83 с.

45. СП 119.13330.2024. СНиП 32-01-95 Железные дороги колеи 1520 мм : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 1 июля 2024 г. № 432/пр. – Москва : Минстрой России, 2024. – 223 с.

46. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87 : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 27 февраля 2017 г. № 125/пр. – Москва : Минстрой России, 2017. – 171 с.

47. СТО РЖД 14.004-2025. Инфраструктура высокоскоростного железнодорожного транспорта. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. – Москва : ОАО «РЖД», 2025. – 161 с.

48. СТУ-3. Специальные технические условия. Земляное полотно участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству. Изменение № 2 от 26.04.2017 № 14575-ЛС/03. – Санкт-Петербург, 2014. – 43 с.

49. Проект технологического регламента по сооружению и контролю качества строительства земляного полотна железнодорожного пути. Первая редакция, Этап 1. – Москва : РУТ, 2020. – 242 с.

50. Методика расчета осадки земляного полотна железнодорожного пути (первая редакция). – Москва : РУТ, 2020. – 82 с.

51. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 3 ноября 2015 г. № 1694-ст. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 18 с.

52. ISO/TS 17892-12 Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of Atterberg limits. – Geneva, Switzerland, 2004. – 22 p.

53. ASTM D-4318-10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. – West Conshohocken, PA, USA, 2010. – 16 p.

54. Makeeva, T. G. Dielectric properties of composite materials based on cement of different genesis / T. G. Makeeva, D. M. Egorov // Natural and Technical Sciences. – 2013. – No. 6. – P. 64–72.

55. Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar – An experimental, numerical simulation and modelling development / A. Benedetto, F. Tosti, L. Bianchini Ciampoli [et al.] // Construction and Building Materials. – 2017. – No. 140. – P. 508–520.

56. Methods of Soil Analysis, Part 4 : Physical Methods / J. Dane, G. Topp (eds.) // Soil Science Society of America Book Series, no. 5. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI. 2002. Hardback, 1692 p. – ISBN 0-89118-841-X.

57. Benedetto, A. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain / A. Benedetto // *Journal of Applied Geophysics*. – 2010. – No. 71. – P. 26–35. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2010.03.001.
58. Boyarsky, D. The effect of coherent water on the dielectric constant of wet and frozen soils / D. Boyarsky, V. Tikhonov. – Moscow : Preprint IKI RAS, 2003. – 48 p.
59. Incorporating road safety into pavement management / S. Tighe, N. Li, L. C. Falls, R. Haas // *Transportation Research Record*. – 2000. – No. 1699. – P. 1–10. – DOI 10.3141/1699-01.
60. Исследование структурных и спектральных характеристик свободной и связанной воды в каолините / А. С. Каспржицкий, Г. И. Лазоренко, С. Н. Сулавко, [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. – 2016. – № 121 (3). – С. 28–34. – DOI 10.7868/S0030403416090117.
61. Resonance Method for Determining Moisture of Cohesive Soils at the Plastic Limit / P. Daniel, V. Yavna, S. Sulavko [et al.] // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2020. – No. 15 (4). – P. 1007–1013. – DOI 10.36478/jeasci.2020.1007.1013.
62. Mechanism research on surface hydration of kaolinite, insights from DFT and MD simulations / J. Chen, F.-F. Min, L.-Y. Liu, C.-F. Liu // *Applied Surface Science*. – 2019. – No. 476 (1). – P. 6–15. – DOI 10.1016/j.apsusc.2019.01.081.
63. Brandt, A. A. Study of dielectrics at microwave frequencies / A. A. Brandt. – Moscow : Fizmatgiz, 1963. – 404 p.
64. Method for remote measurement of specific conductivity and moisture of subsurface soil horizons / G. Linets, A. Bazhenov, S. Malygin [et al.] // *Smart Agricultural Technology*. – 2024. – Vol. 8. – Article no. 100503.
65. Cosenza, P. Indirect determination of soil water content. / P. Cosenza / *E3S Web of Conferences*. – 2016. – No. 9. – P. 1–6. – DOI 10.1051/e3sconf/20160904004.
66. Gregory, A. P. A review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids / A.P. Gregory, R. N. Clarke // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2006. – No. 13 (4). – P. 727–743. – DOI 10.1109/TDEI.2006.1667730.

67. Infrared spectroscopy of low-dimensional systems: Tutorial / A. I. Efimova, L. A. Golovan, P. K. Kashkarov [et al.]. – Saint-Petersburg : “Lan” publishing house, 2016. – 239 p.

68. On the model of an effective medium for particles with a complex structure / L. A. Apresyan, D. V. Vlasov, D. A. Zadorin, V. I. Krasovsky // Journal of Technical Physics. – 2017. – No. 1 (62). – P. 6–13. – DOI 10.1134/S1063784217010029.

69. Topp, G. C. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines / G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan // Water Ressources Research. – 1980. – No. 3 (16). – P. 574–582. – DOI 10.1029/WR016I003P00574.

70. Topp, G. C. Electromagnetic Determination of Soil Water Content Using TDR : I. Applications to Wetting Fronts and Steep Gradients Soil / G. C Topp, J. L. Davis, A. P. Annan // Soil Science Society of America Journal. – 1982. – Vol. 46 (4). – P. 672–678.

71. ГОСТ 21718-84. Материалы строительные. Диэлькометрический метод измерения влажности : издание официальное : введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 9 августа 1984 г. № 130 с 01.07.85. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 4 с.

72. Комиссаренков, А. А. Кондуктометрия и высокочастотное титрование: учебно-методическое пособие / А. А. Комиссаренков, Г.Ф. Пругло. – Санкт-Петербург : ГОУ ВПО СПбГТУРП, 2009. – 42 с.

73. Ritz, M. Application of infrared spectroscopy and chemometric methods to identification of selected minerals / M. Ritz, L. Vaculikova, E. Plevova // Acta Geodynamica et Geomaterialia. – 2011. – No. 8(1). – P. 47–58.

74. Study of IR spectra of a polymineral natural association of phyllosilicate minerals / V. A. Yavna, A. S. Kasporzhitskii, G. I. Lazorenko, A. G. Kochur // Optics and spectroscopy. – 2015. – No. 118 (4). – P. 529–536. –DOI 10.1134/S0030400X15040220.

75. Annan, A. P. Ground penetrating radar applications, principles, procedures. Mississauga / A. P. Annan. – Canada : Sensors and Software, 2004. – 278 p.

76. Grinev, A. Yu. Subsurface radar issues : collective monograph / A. Yu. Grinev, A. Yu. Grineva. – Moscow : Radiotekhnika, 2005. – 413 p. – ISBN 5-88070-070-4.
77. GPR determination of physical parameters of motor road and railway structural layers / Z. Khakiev, V. Shapovalov, A. Kruglikov, V. Yavna // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – No. 106. – P. 139–145. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2014.04.017.
78. Investigation of long term moisture changes in trackbeds using GPR / Z. Khakiev, V. Shapovalov, A. Kruglikov [et al.] // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – No. 110. – P. 1–4. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2014.08.014.
79. Determination of the complex permittivity and soil moisture by GPR / Z. B. Khakiev, V. A. Yavna, S. N. Sulavko, K. Kislitsa // 12<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering Geophysics. – 2016. – No. 12. – P. 226–234. – ISBN 978-1-5108-2286-3.
80. Experimental study of soil compaction effects on GPR signals / P. Wang, Zh. Hu, Y. Zhao, X. Li // Journal of Applied Geophysics. – 2016. – No. 126. – P. 128–137. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2016.01.019.
81. Identifying frost-susceptible areas on Finnish railways using the ground penetrating radar technique / M. Silvast, A. Nurmikolu, B. Wiljanen, M. Levomäki // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2013. – No. 227 (1). – P. 3–9. – DOI 10.1177/0954409712452076.
82. Saintenoy, A. Ground Penetrating Radar: Water Table Detection Sensitivity to Soil Water Retention Properties / A. Saintenoy, A. Saintenoy, J.W. Hopmans // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2011. – No. 4 (4). – P. 748–753. – DOI 10.1109/JSTARS.2011.2171920.
83. Hydrodynamic Parameters of a Sandy Soil Determined by Ground-Penetrating Radar Monitoring of Porchet Infiltrations / E. Leger, A. Saintenoy, P. Tucholka, Y. Coquet // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2016. – No. 9 (1). – P. 188–200. – DOI 10.1109/JSTARS.2015.2464231.
84. Electrophysical Properties of Bentonite and Kaolin Depending on Salinity and Temperature / V. A. Yavna, S. N. Sulavko, A. G. Kochur, A. A. Vasilchenko, P. Daniel // 16<sup>th</sup> Engineering and Mining Geophysics 2020. – 2020. – P. 1–9. – DOI 10.3997/2214-4609.202051117.

85. Electrophysical Properties of Sand-Water Mixtures in Various Phase States / V. A. Yavna, S. N. Sulavko, A. G. Kochur, A. A. Vasilchenko, P. Daniel // 16<sup>th</sup> Engineering and Mining Geophysics 2020. – 2020. – P. 1–6. – DOI 10.3997/2214-4609.202051116.

86. Rhoades, J. D. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity / J. D. Rhoades, P. A. C. Raats, R. J. Prather // Article in Soil Science Society of America Journal – 1976. – No. 40. – P. 651–655. DOI 10.2136/sssaj1976.03615995004000050017x.

87. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations / J. D. Rhoades, N. A. Manteghi, P. J. Shouse, W. J. Alves // Soil Science Society of America Journal. – 1989. – P. 433–439. – DOI 10.2136/SSSAJ1989.03615995005300020020X.

88. Исследование электрических свойств глинистых алюмосиликатов методами электрических измерений. – Текст : электронный / Д. В. Ольховатов, К. М. Ермолов, С. Н. Сулавко, В. А. Явна // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 4. – С. 248. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5527](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5527) (дата обращения: 10.10.2025).

89. Khakiev, Z. B. Efficiency evaluation of ground-penetrating radar by the results of measurement of dielectric properties of soils / Z. B. Khakiev, K.U. Kislitsa, V.A. Yavna // Journal of Applied Physics. – 2012. – № 112 (12). – Article no. 124909. – DOI 10.1063/1.4770470.

90. Blanc, P. Accurate quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by XRD: comparison of a Rietveld and a reference intensity ratio (RIR) method and the importance of sample preparation / P. Blanc, O. Legendre, E. Gaucher. // Physics and Chemistry of the Earth. – 2007. – No. 32. – P. 135–144.

91. Quantification of the mineralogical composition of clays using FTIR spectroscopy / S. Kaufhold, M. Heina, R. Dohrmanna, K. Ufer // Vibrational Spectroscopy. – 2012. – No. 59. – P. 29–39. – DOI 10.1016/j.vibspec.2011.12.012.



92. Dolinar, B. Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value correlations / B. Dolinar // *Applied Clay Science*. – 2009. – No. 45. – P. 90–94. – DOI 10.1016/J.CLAY.2009.04.001.
93. Kozłowski, T. Unfrozen Water Content in Representative Bentonites of Different Origin Subjected to Cyclic Freezing and Thawing / T. Kozłowski, E. Nartowska // *Vadose Zone Journal*. – 2012. – No. 12 (1). – P. 11. – DOI 10.2136/vzj2012.0057.
94. Born, M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – 7<sup>th</sup> (expanded) edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 952 p.
95. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие с 1 января 2017 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 июля 2016 г. № 891-ст. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
96. Wu, J.-H. Experimental study of matric suction measurement and its impact on shear strength under drying-wetting cycles for expansive soils / J.-H. Wu, S. Yang // *Yantu Lixue. Rock and Soil Mechanics*. – 2017. – Vol. 38 (3). – P. 678–684. – DOI 10.16285/j.rsm.2017.03.009.
97. Experimental research on expansion characteristics of Mengzi expansive soil with water, salt and acid immersion / Zh. Li, C. Tang, R. Hu, Y. Zhou // *Environmental Earth Sciences*. – 2014. – Vol. 72 (2). – P. 363–371. – DOI 10.1007/s12665-013-2957-z.
98. Papagiannakis, A. T. Retaining structures in expansive clays / A. T. Papagiannakis, S. Bin-Shafique, R. L. Lytton // *Geotechnical and Geological Engineering*. – 2014. – Vol. 32 (6). – P. 1405–1414. – DOI 10.1007/s10706-013-9700-0.
99. Chen, F. H. Foundations on Expansive Soils' / F. H. Chen. – 2<sup>nd</sup> ed. – Amsterdam : Elsevier Scientific Publishing Co., 1988. – 464 p. – ISBN 978-0444430366.
100. Typical geomechanical problems associated with railroads on shrink-swell soils / M. S'anchez, D. Wang, J.-L. Briaud, C. Douglas // *Transportation Geotechnics*. – 2014. – Vol. 1 (4). – P. 257–274. – DOI 10.1016/j.trgeo.2014.07.002.

101. Ke, Z. J. Failure and repair of the slope of railway embankments and expansive soils / Z. J. Ke, C.-H. Yong, Y. H. Chang // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. – 1988. – P. 20.

102. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: a review / G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, Z. Khakiev, V. Yavna // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 205. – P. 111–136. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184.

103. Effects of chemical stabilizers on an expansive clay / H. Zhao, L. Ge, T. M. Petry, Y.-Z. Sun // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – Vol. 18 (4). – P. 1009–1017.

104. Mokhtari, M. Swell-shrink behavior of expansive soils, damage and control / M. Mokhtari, M. Dehghani // International Journal of Geotechnical Engineering. – 2012. – Vol. 17. – P. 2673–2682.

105. Soğancı, A. S. The effect of polypropylene Fiber in the stabilization of expansive soils / A. S. Soğancı // International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. – 2015. – Vol. 9. – P. 8.

106. Eyo, E. U. Effect of intrinsic microscopic properties and suction on swell characteristics of compacted expansive clays / E. U. Eyo, S. Ng'ambi, S. J. Abbey // Transportation Geotechnics. – 2019. – Vol. 18. – P. 124–131. – DOI 10.1016/j.trgeo.2018.11.007.

107. Katti, D. R. Role of clay-solvent inter and intraparticle interactions on swelling characteristics of montmorillonite nano-meso-micro scale particulate systems / D. R. Katti, K. S. Katti, V. Shanmugasundaram // Materials Research Society Symposium Proceedings. – 2002. – Vol. 704. – P. 257–262.

108. Effect of montmorillonite content and sodium chloride solution on the residual swelling pressure of an expansive clay / W.-L. Zou, J.-B. Ye, Z. Han, S. K. Vanapalli, H.-Y. Tu // Environmental Earth Sciences. – 2018. – Vol. 77 (19). – P. 677.

109. Srodon, J. Quantitative mineralogy of sedimentary rocks with emphasis on clays and with applications to K–Ar dating / J. Srodon // Mineralogical Magazine. – 2002. – Vol. 66. – P. 677–687. – DOI 10.1180/0026461026550055.

110. Some successful approaches to quantitative mineral analysis as revealed by the 3rd Reynolds Cup contest / O. Omotoso, D. K. McCarty, R. Kleeberg, S. Hillier // *Clays and Clay Minerals*. – 2006. – Vol. 54 (6). – P. 748–760. – DOI 10.1346/CCMN.2006.0540609.

111. Hillier, S. Accurate quantitative analysis of clay and other minerals in sandstones by XRD: comparison of a Rietveld and a reference intensity ratio (RIR) method and the importance of sample preparation / S. Hillier // *Clay Minerals*. – 2000. – Vol. 35. – P. 291–302. – DOI 10.1180/000985500546666.

112. Infrared attenuated total reflectance spectroscopy: an innovative strategy for analyzing mineral components in energy relevant systems / C. M. Muller, B. Pejčić, L. Esteban [et al.] // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 4. – P. 6764. – DOI 10.1038/srep06764.

113. Ritz, M. Application of infrared spectroscopy and chemometric methods to identification of selected minerals / M. Ritz, L. Vaculikova, E. Plevova // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. – 2011. – Vol. 8 (1). – P. 47–58.

114. Identification of components in smectite/kaolinite mixtures / J. Madejova, J. Keckes, H. Palkova, P. Komadel // *Clay Minerals*. – 2002. – Vol. 37. – P. 377–388.

115. Quantification of the mineralogical composition of clays using FTIR spectroscopy / S. Kaufhold, M. Heina, R. Dohrmanna, K. Ufer // *Vibrational Spectroscopy*. – 2012. – Vol. 59. – P. 29–39. – DOI 10.1016/j.vibspec.2011.12.012.

116. Madejovra, J. Baseline studies of the clay minerals society source clays: infrared methods / J. Madejovra, P. Komadel // *Clays and Clay Minerals*. – 2001. – Vol. 49 (5). – P. 410–432. – DOI 10.1346/CCMN.2001.0490508.

117. A study of the structural and spectral characteristics of free and bound water in kaolinite / A. S. Kasprzhitskii, G. I. Lazorenko, S. N. Sulavko [et al.] // *Optics and Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 121 (3). – P. 357–363. – DOI 10.1134/S0030400X16090113.

118. DFT theoretical and FT-IR spectroscopic investigations of the plasticity of clay minerals dispersions / A. Kasprzhitskii, G. Lazorenko, V. Yavna, P. Daniel // *Journal*

of Molecular Structure. – 2016. – Vol. 1109. – P. 97–105. – DOI 10.1016/j.molstruc.2015.12.064.

119. Study of IR spectra of a polymineral natural association of phyllosilicate minerals / V. A. Yavna, A. S. Kasprzhitskii, G. I. Lazorenko, A. G. Kochur // Optics and Spectroscopy. – 2015. – Vol. 118 (4). – P. 529–536. – DOI 10.1134/S0030400X15040220.

120. Peng, J. The classification scheme for fine-grained sedimentary rocks: A review and a new approach based on five inherent rock attributes / J. Peng, Z. Hu, D. Feng // Gondwana Research. – 2025. – Vol. 145. – P. 107–141. – DOI 10.1016/j.gr.2025.04.014.

121. Шлыков, В.Г. Использование структурных характеристик глинистых минералов для оценки физико-химических свойств дисперсных грунтов / В.Г. Шлыков // Геоэкология. – 2000. – №1. – С.43-52.

122. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие с 1 июля 2015 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2022-ст. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 18 с.

123. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие с 1 января 2021 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 37 с.

124. Nartowska, E. The changes in the microstructure of ion-exchanged clays / E. Nartowska, T. Kozłowski, M. Kolankowska // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 17. – Article no. 00063. – DOI 10.1051/e3sconf/20171700063.

125. Xu, B. The translation mechanism of smectite to illite: an infrared spectroscopic study of ordered mixed-layer illite/smectite / B. Xu, S. Ding, H. Cheng // Spectroscopy Letters. – 2014. – Vol. 47. – P. 543–548. – DOI 10.1080/00387010.2013.821134.

126. Mid-infrared spectroscopic assessment of plasticity characteristics of clay soils / A. Kasprzhitskii, G. Lazorenko, A. Khater, V. Yavna // *Minerals*. – 2018. – Vol. 8 (5). – P. 184. – DOI 10.3390/min8050184.

127. Comparison of soil water content estimation equations using ground penetrating radar / P. Anbazhagan, M. Bittelli, R. R. Palapati, P Mahajan // *Journal of Hydrology*. – 2020. – Vol. 588. – Article no. 125039. – DOI 10.1016/j.jhydrol.2020.125039.

128. Arcone, S. A. Maxwell–Wagner relaxation in common minerals and a desert soil at low water contents / S. A. Arcone, G. E. Boitnott // *Journal of Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 81. – P. 97–105. – DOI 10.1016/J.JAPPGEO.2011.09.005.

129. Chelidze, T. Electrical spectroscopy of porous rocks: A review-II. Experimental results and interpretation / T. Chelidze, Y. Gueguen, C. Ruffet / *Geophysical Journal International*. – 1999. – Vol. 137. – P. 16–34. – DOI 10.1046/j.1365-246x.1999.00800.x.

130. Deal, B. General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon / B. Deal, A. Grove // *Journal of Applied Physics*. – 1965. – Vol. 36. – P. 3770–3778. – DOI 10.1063/1.1713945.

131. Percolation monitoring and water content estimation by Ground Penetrating Radar in a controlled environment / M. Dossi, E. Forte, S. Andri [et al.] // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 190 (4). – Article no. 104336. – DOI 10.1016/j.jappgeo.2021.104336.

132. Klotzsche, A. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Decade of Progress / A. Klotzsche, F. Jonard, M.C. Looms, [et al.] // *Vadose Zone Journal*. – 2018. – Vol. 17, Iss. – 1. – P. 1-9. – DOI 10.2136/vzj2018.03.0052

133. Integrated GPR and laboratory water content measures of sandy soils: from laboratory to field scale / M. Ercoli, L. Di Matteo, C. Pauselli [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 159. – P. 734–744. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.082.

134. Behaviour of spent HTR fuel elements in aquatic phases of repository host rock formations / J. Fachinger, M. den Exter, B. Grambow [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2006. – Vol. 236, Iss. 5–6. – P. 543–554. – DOI 10.1016/j.nucengdes.2005.11.023.

135. Kaviratna, P. D. Dielectric properties of smectite clays / P. D. Kaviratna, Thomas J. Pinnavaia, P. A. Schroeder // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1996. – Vol. 57, Iss. 12. – P. 1897–1906.

136. Determination of complex permittivity and soil moisture by the GPR method / Z. B. Khakiev, V. A. Yavna, S. N. Sulavko, K. Yu. Kislitsa // 12<sup>th</sup> Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016. – April 2016. – P. 226–234. – ISBN 978-1-5108-2286-3.

137. Knight, R. J. The dielectric constant of sandstones, 60kHz to 4 MHz / R. J. Knight, A. Nur // Geophysics. – 1987. – Vol. 52, No. 5. – P. 644–654. – DOI 10.1190/1.1442332.

138. Olsson, S. Characterisation of bentonites from Kutch, India and Milos, Greece – some candidate tunnel back-fill materials? / S. Olsson, O. Karnland // Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company R-09-53. – Stockholm, Sweden, 2009. – P. 1–35.

139. Prodromakis, T. Engineering the Maxwell–Wagner polarization effect / T. Prodromakis, C. Papavassiliou // Applied Surface Science. – 2009. – Vol. 255. – P. 6989–6994. – DOI 10.1016/j.apsusc.2009.03.030.

140. Takoo, R. K. Physico-Chemical Properties of Kutch Bentonite / R. K. Takoo, B. R. Patel // Crystal Research and Technology. – 1986. – Vol. 21, No. 1. – P. 141–144. – DOI 10.1002/CRAT.2170210134.

141. Estimating water content of unsaturated sandy soils by GPR during a drainage experiment / M. H. Zhang, M. Bano, X. Feng [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 660 (1). – Article no. 012018. – DOI 10.1088/1755-1315/660/1/012018.

142. Ашпиз, Е. С. Основная площадка при осевых нагрузках 27 тс / Е. С. Ашпиз, В. В. Виноградов // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 22–25. – ISSN 0131-5765.

143. Application of asphalt based materials in railway systems: A review / X. Xiao, D. Cai, L. Lou, Y. Shi, F. Xiao // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 304. – Article no. 124630.

144. Lidén, T. Dimensioning windows for railway infrastructure maintenance: Cost efficiency versus traffic impact / T. Lidén, M. Joborn // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2016. – Vol. 6, Iss. 1. – P. 32–47. – DOI 10.1016/j.jrtpm.2016.03.002.

145. Тиратурян, А.Н. Параметры оценки эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог / А.Н. Тиратурян, Е.В. Углова // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Ответственный редактор Н.А. Шевченко. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 1038-1040.

146. Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review / G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, Z. Khakiev, V. Yavna // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 205. – P. 111–136. – DOI 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.184.

147. Shahraki, M. Improvement of Soft Subgrade Soil Using Stone Columns for High-Speed Railway Track / M. Shahraki, K. J. Witt // International Conference on Soft Ground Engineering (ICSGE2015). – Singapore, December 2015. – DOI 10.13140/RG.2.1.3673.8325.

148. Campos, J. Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world / J. Campos, G. de Rus // Transport Policy. – 2009. – Vol. 16, Iss. 1. – P. 19–28. – DOI 10.1016/j.tranpol.2009.02.008.

149. Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review / M. Roshan, A. Rashid, N. Wahab [et al.] // Transportation

Geotechnics. – 2022. – Vol. 37. – Article no. 100834. – DOI 10.1016/j.trgeo.2022.100834.

150. Dynamic stress attenuation characteristics of geocell-reinforced railway subgrade / J. Xiao, K. Wang, L. Xue [et al.] // Geosynthetics International. – 2024. – Vol. 31, Iss. 5. – P. 555–567. – DOI 10.1680/jgein.23.00030.

151. Ашпиз Е.С. Оценка устойчивости высоких насыпей с учетом динамики воздействия поездов / Е.С. Ашпиз, А.П. Шмаков // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 2. – С. 7-9. – ISSN 0131-5765.

152. Ланис, А.Л. Армирование основной площадки высокой насыпи с инъецированием твердеющих растворов / А.Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3 (50). – С. 38-46. – ISSN 1815-9265.

153. Тиратурян, А.Н. Определение предельных нагрузок на земляное полотно автомобильной дороги по критерию Кулона-Мора / А.Н. Тиратурян, А.А. // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 1041-1043.

154. Ланис, А.Л. Армирование земляного полотна эксплуатируемых железных дорог / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев // В сборнике: Наука, образование, кадры. Материалы национальной конференции в рамках IX Международного Сибирского транспортного форума. – 2019. – С. 73-86.

155. Ланис, А.Л. К вопросу повышения устойчивости земляного полотна армированием / А.Л. Ланис, К.В. Востриков // В сборнике: Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2016. – С. 87-89.

156. Тиратурян, А.Н. Эмпирические модели сопротивляемости укрепленного грунта земляного полотна / А.Н. Тиратурян, А.В. Воробьев, Г.В. Асланян Г.В. // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы Всероссийской



(национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 1043-1044.

157. Ланис, А.Л. Инженерная подготовка основания при реконструкции земляного полотна / А.Л. Ланис, С.А. Овчинников, П.О. Ломов // В сборнике: Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2016. – С. 90-93.

158. Ланис, А.Л. Улучшение физико-механических характеристик грунтов инъектированием / А.Л. Ланис, Д.А. Разуваев, П.О. Ломов // В книге: Политранспортные системы. Тезисы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия - ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – 2014. – С. 74-75.

159. Дылёв, Е.О. Моделирование напряженно - деформированного состояния насыпи в зоне сопряжения с искусственным сооружением в программном комплексе PLAXIS 2D / Е.О. Дылёв, Е.С. Ашпиз // В сборнике: Комплексное взаимодействие лингвистических и выпускающих кафедр в техническом вузе. Международная научно-практическая конференция, посвященная 125-летию РУТ (МИИТ). Москва. – 2021. – С. 151-153. – ISSN 0131-5765.

160. Певзнер, В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский, [и др.]. // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 2. – С. 38-40. – ISSN 0131-5765.

161. Певзнер, В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский, [и др.]. // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 3. – С. 34-37. – ISSN 0131-5765.

162. Бобкин, А.А. Модели прогнозирования пластических деформаций в слоях дорожных одежд / А.А. Бобкин, А.Н. Тиратурян // Актуальные проблемы

науки и техники. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2024. – С. 1126-1127.

163. Ашпиз, Е.С. О влиянии тяжеловесного движения на земляное полотно / Е.С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 7. – С. 50-53. – ISSN 0044-4448.

164. Тиратурян, А.Н. Моделирование управляющих воздействий на эксплуатационной стадии жизненного цикла автомобильных дорог / А.Н. Тиратурян // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – № 1. – С. 115-127. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.1.115-127.

165. ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний : межгосударственный стандарт : издание официально введен в действие с 1 февраля 2022 г. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2021 г. № 1068-ст. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 27 с.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2020666996**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2020666996  
Дата регистрации: 18.12.2020  
Номер и дата поступления заявки:  
2020661431 01.10.2020  
Дата публикации и номер бюллетеня:  
18.12.2020 Бюл. № 12  
Контактные реквизиты:  
Нет

Автор(ы):  
Явна Виктор Анатольевич (RU),  
Шаповалов Владимир Леонидович (RU),  
Васильченко Андрей Александрович (RU),  
Окост Максим Викторович (RU),  
Морозов Андрей Владимирович (RU)  
Правообладатель(и):  
Явна Виктор Анатольевич (RU),  
Шаповалов Владимир Леонидович (RU),  
Васильченко Андрей Александрович (RU),  
Окост Максим Викторович (RU),  
Морозов Андрей Владимирович (RU)

Название программы для ЭВМ:

**«Программа обработки георадиолокационного разреза увлажненного конструкционного слоя из дренирующих грунтов»**

**Реферат:**

Программа предназначена для осуществления контроля влажности конструкционных слоев, выполненных из дренирующих грунтовых материалов, при подготовке строительных работ по возведению земляного полотна автомобильных и железных дорог. Программа реализует обработку как отдельной радарограммы, соответствующей определенному распределению влажности в конструкционном слое, так и последовательности радарограмм, отражающих процесс дренирования воды при подготовке конструкционного слоя к выполнению строительных работ. Разработанные процедуры обработки георадиолокационных данных позволяют проводить оценку величины и однородности увлажнения конструкционного слоя по глубине. В процессе выполнения программы осуществляется расчет: показателя преломления верхней части конструкционного слоя; коэффициента ослабления электромагнитного излучения грунтовым слоем; удельной проводимости грунтового слоя; отражательной и относительной отражательной способности грунта конструкционного слоя. Для оценки глубины дренирования воды в грунтовом слое выполняется оценка поведения относительной отражательной способности электромагнитного излучения, которая характеризует глубину слоя, обладающего максимальной влажностью. Результаты расчетов верифицированы прямыми измерениями влажности, выполненными по ГОСТ 5180-2015. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК; ОС: Windows 7/8/10; Linux Oracle 7.x; Red Hat Enterprise 5.5+1x, 6x, 7x; Suse 10/11/12; Ubuntu 14.x; Mac OS X 10.8.3+, 10.9+

**Язык программирования:** Fortran

**Объем программы для ЭВМ:** 0,61 МБ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**RU2021665157**

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства):  
2021665157  
Дата регистрации: 21.09.2021  
Номер и дата поступления заявки:  
2021664358 13.09.2021  
Дата публикации и номер бюллетеня:  
21.09.2021 Бюл. № 10  
Контактные реквизиты:  
нет

Автор(ы):  
Явна Виктор Анатольевич (RU),  
Шаповалов Владимир Леонидович (RU),  
Васильченко Андрей Александрович (RU),  
Окост Максим Викторович (RU),  
Морозов Андрей Владимирович (RU),  
Ермолов Яков Михайлович (RU)  
Правообладатель(и):  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Ростовский государственный  
университет путей сообщения» (RU)

Название программы для ЭВМ:

**«Программа для контроля уплотнения грунтов при строительстве земляного полотна по данным георадиолокационного обследования»**

**Реферат:**

Программа предназначена для осуществления контроля плотности грунтовых конструктивных слоев, выполненных из несвязных материалов, при проведении строительных работ по возведению земляного полотна автомобильных и железных дорог. Программа ориентирована для применения в полевых условиях для контроля процесса строительства земляного полотна в составе георадиолокационных программно-аппаратных комплексов. Анализ георадиолокационной информации, получаемой при уплотнении земляного полотна, позволяет определить скорость достижения проектной плотности, обоснованность выбора толщины уплотняемого слоя, а также локализовать области с аномальными значениями плотности.

**Язык программирования:** Fortran

**Объем программы для ЭВМ:** 5,45 МБ